

*Prof. dr. sc. Miroslav Plohl*  
Emeritus Instituta Ruđer Bošković, Zagreb  
plohl@irb.hr

00-00

## KRATKI PREGLED ISTRAŽIVANJA GENOMA U SVJETLU OPĆE TEORIJE SUSTAVA

**Sažetak:** Prema Općoj teoriji sustava, svijet je strukturiran kao niz međudjelujućih sustava koji se podvrgavaju istim zakonitostima te svi zajedno čine cjelinu. U biologiji tako treba na svim razinama odgovoriti na sva pitanja o strukturama i procesima te organizaciji koja ih čini funkcionalnim. Istraživanje zakonitosti nasljeđivanja, gena i molekule deoksiribonukleinske kiseline (DNK) pokazala su da višestanični organizmi imaju daleko više DNK nego što je potrebno za same gene. Ovaj „višak“ DNK se dugo vremena smatrao beskorisnim opterećenjem, a pokazalo se da predstavlja i značajnu prepreku projektima sastavljanja genoma. Zahvaljujući razvoju tehnologije i bioinformatike ova paradigma je promijenjena. Današnja istraživanja, a u skladu s idejom da nasljedna informacija u genomu treba činiti cjeloviti sustav, pokazala su brojne uloge ove dodatne DNK, prvenstveno u definiranju genomske arhitekture, funkcije i evolucije.

**Ključne riječi:** Opća teorija sustava, Ludwig von Bertalanffy, gen, genom, ponovljene sekvence DNK, projekti sastavljanja genoma, bioinformatika

**Key words:** General Systems Theory, Ludwig von Bertalanffy, gene, genome, repetitive DNA sequences, genome assembly projects, bioinformatics

### Uvod

Kako povezati povijest, filozofiju i tehniku s molekularno-genetičkim istraživanjima? U ovom slučaju, moj interes za poveznicom tih područja započeo je slučajnim susretom s profesorom Zvonkom Benčićem (1940-2021), jednim od utemeljitelja energetske elektronike u Hrvatskoj, u jesen 2019, u blizini Kazališne kavane u Zagrebu. S profesorom sam se poznavao od ranije i bio upoznat s njegovim intenzivnim radom na prikupljanju materijala i pisanju knjiga o značajnim osobama u našoj novijoj tehničkoj (i ne samo tehničkoj) povijesti. No ovaj put me iznenadio s viješću da je započeo radom na

prijevodu knjige Opća teorija sustava<sup>1</sup> koju je napisao Ludwig von Bertalanffy<sup>2</sup>, biolog i filozof vrlo širokog obrazovanja i u područjima kao što su matematika, teorija informacija, termodinamika, biokemija, biofizika, medicina, psihologija, lingvistika i druga, osoba čiju je nominaciju za Nobelovu nagradu prekinula iznenadna smrt 1972. godine. Profesor Benčić me tom prilikom upitao da li bih pomogao u prevođenju i pojašnjavanju prevedenih bioloških pojmova, što sam s radošću prihvatio. Ova knjiga o sustavima i sustavskom gledanju na svijet (o čemu, priznajem, ranije nisam previše razmišljao) mi se jako svidjela. Čitajući ju, shvatio sam kako se neka razmišljanja obrađena u knjizi mogu dobro primijeniti i na probleme s kojima se susreću suvremena genomska istraživanja, koja su moj primarni interes tijekom cijele znanstvene karijere.

Ubrzani tehnički i tehnološki razvoj današnjice dovodi do sve veće složenosti i isprepletenosti različitih područja znanja, uključivo i sve tješnjeg povezivanja prirodnih, tehničkih i društvenih znanstvenih istraživanja. Ovaj proces je u skladu s osnovnom idejom koju je u Općoj teoriji sustava [1] postavio von Bertalanffy. Prema ovom shvaćanju, svijet u kojem živimo, u svojem cjelovitom rasponu (od subatomske čestice i kemijskih reakcija do bioloških organizama, ekoloških sustava i društvenih procesa) postoji kao strukturirana organizacija međudjelujućih sustava koji se podvrgavaju istim zakonima, bez obzira o čemu se radilo. Za razumijevanje svijeta potrebno je dakle primijeniti sveobuhvatni pristup koji von Bertalanffy označava kao transdisciplinarni, jer objedinjuje prirodne, tehničke i društvene znanosti. Tako u biologiji, na primjer, nema smisla proučavati isključivo izolirane strukture i procese nego na svim razinama riješiti i probleme njihove organizacije koja ih čini funkcionalnim. Možda se ove misli danas mogu učiniti razumljivim same po sebi, iako u prvoj polovici prošlog stoljeća, ali i kasnije, i nije bilo baš uvijek tako, osobito ne u vrijeme oduševljenja otkrivanjem molekularnih detalja živih organizama bez poznavanja njihovih složenih međudjelovanja.

U današnjoj biologiji sve se češće povezuju različita područja istraživanja. Tako je uveden pojam 'integrativna biologija', što bi odgovaralo poimanju biologije kako ju je vidio von Bertalanffy: '...organizmička koncepcija osnova je moderne biologije. Nužno je proučavati ne samo izolirane dijelove i procese nego i rješavati presudne probleme organizacije u cilju povezivanja dijelova.' [1, str 26]. Integrativna biologija je u svojoj osnovi multidisciplinarna i uključuje eksperimentalnu i teoretsku biologiju, računarstvo, matematiku, kemiju, fiziku i inženjerstvo, kako bi se postiglo holističko razumijevanje živih organizama i biomedicinskih problema povezivanjem staničnih i molekularnih procesa, fiziologije, genetike, razvojne i evolucijske biologije, morfologije, bioloških raznolikosti i ekologije, ali i psihologije, sociologije, lingvistike i drugog. Integrativna biologija postoji kao izdvojen studij, na primjer na prestižnom sveučilištu Harvard<sup>3</sup> (SAD). Potrebu za integracijom ovih disciplina spominjao je i von Bertalanffy, koji se u svojim biološkim istraživanjima prvenstveno bavio teoretskim i eksperimentalnim proučavanjem fiziologije i kvantitativnog metabolizma, regulatornih sustava i njihovih povezivanja. Uz značaj njegovog cjelokupnog nasljeđa [2], posebno je prepoznat po kvantitativnom modelu rasta organizma objavljenom 1934. godine, koji se, proširen na biocenoze i proliferaciju stanica primjenjuje još i danas [3, 4].

Temeljna otkrića u prirodnim znanostima povezana su s tehnikom, jer su gotovo uvijek u velikoj mjeri ovisila o tehničkoj domišljatosti i vještini izrade raznih instrumenata, makar i najjednostavnijih, s obzirom da samo promatranje i logično zaključivanje u pravilu ne mogu zadovoljiti radoznalost i ponuditi odgovore na sva pitanja koje čovjek postavlja, uključivo i filozofska. Tako je početkom 17. stoljeća jednostavnim teleskopom vlastite izrade Galileo promatrao nebeska tijela i

---

<sup>1</sup> Opća teorija sustava – osnove, razvoj, primjene (1968) predstavlja kompilaciju znanstvenih radova Ludwiga von Bertalanffya kojima autor ukazuje na opće zakonitosti koje povezuju prirodna, tehnička i društvena područja istraživanja. Po prvi put, na hrvatski su je preveli prof. Zvonko Benčić i prof. Franjo Jović. Profesor Benčić nije doživio promociju ove knjige na jesen 2022. godine na FER-u u Zagrebu.

<sup>2</sup> Karl Ludwig von Bertalanffy, Beč, Austrija, 1901 – Buffalo, SAD, 1972.

<sup>3</sup> <https://lifesciences.fas.harvard.edu/ib>

njihova kretanja, a umješnošću izrađivanja leća i jednostavnih mikroskopa Antonie van Leeuwenhoek je nešto kasnije, u 70-tim i 80-tim godinama istog stoljeća, opisao stanice i jednostanične organizme. Oba istraživanja predstavljala su proboje u znanosti svojeg doba te su promijenila poimanje svijeta. Potreba za vještim osmišljavanjem i izradom instrumenata presudna je i danas, ali na puno složenijoj razini. Tako se instrumentalnim sustavima kao što je *Veliki hadronski sudarač*<sup>4</sup> CERN-a nastoji odgovoriti na temeljna pitanja fizike o elementarnim česticama i silama. U biologiji se može kao primjer izdvojiti tehnologija treće generacije sekvenciranja molekule deoksiribonukleinske kiseline (DNK) kojom se određuje sastav jedne po jedne molekule DNK kontinuirano i u znatno većoj duljini nego prijašnjim metodama, dok pohrana i analiza podataka istovremeno zahtijeva računalnu tehnologiju velikog kapaciteta kao i izradu složenih računalnih algoritama. Već kratkim navođenjem ovih primjera može se zaključiti kako postoji „uzvojnica“ u procesu sakupljanja i primjene znanja, u kojoj napredak tehnike omogućuje izgradnju sve sofisticiranijih istraživačkih instrumenata koji dovode do novih otkrića koja će opet svojom primjenom dovesti do daljnjeg napretka tehnike i tehnologije, a zajedno će mijenjati paradigme naših spoznaja o svijetu koji nas okružuje. Na primjer, otkriće strukture molekule DNK 1953. godine i potpuno „razbijanje“ genetičkog koda do 1965. godine kao rezultati temeljnih znanstvenih istraživanja (tj. motiviranih jednostavno radoznalošću) postavili su temelje primjenjenog genetičkog inženjerstva, npr. u proizvodnji hrane i medicini, ali i polaznu točku za daljnja istraživanja.

Novi rezultati nisu uvijek dobrodošli, osobito kada se ne uklapaju u ranije prihvaćena razmišljanja i predodžbe. Poznata je onovremena reakcija na rezultate Galileovog rada. Rezultati koje je Antonie van Leeuwenhoek oko 1670-1680 godine objavljivao u časopisu *Philosophical Transactions of the Royal Society* (London), naišla su prvo na nevjericu, čak i omalovažavanje, zbog teškog prihvaćanja ideje postojanja mikroskopskih jednostaničnih organizama nevidljivih bez optičkog instrumenta. Kao posljedica brzog razvoja znanosti i u današnjem vremenu novi rezultati često mijenjaju (a ne samo nadograđuju) postojeće koncepte, što često nailazi na skepsu. Tako razvoj znanosti nije ni danas oslobođen krivih pretpostavki koje se greškom ili ishitrenošću pojavljuju te stjecajem okolnosti postaju više ili manje teško promjenljiva paradigma.

U ovom prikazu ću na primjeru proučavanja genoma pokazati kako se u zadnjih 20-tak godina uz pomoć napretka u tehnici i računarstvu u osnovi promijenilo razumijevanje genomske strukture, funkcije i evolucije. Ove promjene u skladu su s idejom što šireg povezivanja dijelova i procesa, što potom doprinosi cjelovitijem razumijevanju stvarnosti, kako je to u svojem teorijskom razmišljanju raspravljao von Bertalanffy. U slijedećim odlomcima objasniti ću neke dugogodišnje nedoumice, probleme i zablude u istraživanju genomske DNK koja se odnose na broj gena u genomima, veličinu genoma i tako zvani „višak“ DNK, poimanje kojih se dramatično promijenilo u novije vrijeme.

## **1. Genetička informacija**

### **1.1. Biološko nasljeđivanje**

Utemeljitelj suvremene genetike je Gregor Mendel (1822-1884), augustinski redovnik u Brnu (Češka). Mendel je križao biljke graška i proučavao nasljeđivanje različitih osobina, ukupno sedam (boja i položaj cvijeta, boja i oblik mahune, boja i oblik zrna graška, visina biljke) te brojio i računao omjere naslijeđenih osobina koje su se pojavljivale kod križanja različitih roditeljskih parova. Pri tomu je sretno odabrao upravo one osobine koje se nasljeđuju potpuno neovisno, tj. zato, to znamo danas, jer su kodirane na različitim kromosomima. Također, radi se o osobinama koje se nasljeđuju po načelu ili-ili, na primjer, mahuna je ili zelena ili žuta, a ne postoji miješanje osobina kao u nekim drugim

---

<sup>4</sup> Engl. Large Hadron Collider

slučajevima<sup>5</sup>. Ovo je jedan od rijetkih primjera u kojem je povijesni proboj u znanosti napravljen isključivo promatranjem, vrhunskim logičkim planiranjem i zaključivanjem, a istraživačka „oprema“ sastojala se od kistića za oprašivanje cvjetova i vrtlarskog alata. Najvažniji rezultat Mendelova rada jest zaključak da se biološko nasljeđivanje zasniva na prenošenju informacije o pojedinim osobinama s roditelja na potomstvo, a ne na nasljeđivanju samih osobina, kao što se često pretpostavljalo u to doba. Gregor Mendel je informaciju koja se nasljeđuje na njemačkom jeziku nazvao *merkmal* (~ obilježje, osobitost), a koja u potpunosti odgovara pojmu onoga što danas poznajemo kao gen.

## 1.2. Molekularna osnova genetičke informacije

Niz istraživanja koja su uslijedila dovela su do spoznaje da materijalnu osnovu genetičke informacije predstavlja molekula DNK, čija su strukturu, na osnovu podataka koje su kristalografskim analizama X-zrakama dobili Rosalind Franklin i Maurice Wilkins, prvi objasnili Francis Crick i James Watson<sup>6</sup> u znanstvenom članku objavljenom 1953. godine [5]. Ukratko, to je danas svima poznata dvostruka uzvojnica, sastavljena od dva lanca koji se obavijaju jedan oko drugog. Molekula može biti vrlo duga, ograničenje je jedino u pucanju preduge niti. Sama uzdužna okosnica lanca je monotona i potpuno neinformativna, a sastoji se od naizmjenice povezanih šećera deoksiriboze i fosfatne skupine. Smještene prema unutarnjem dijelu dvostruke uzvojnice, preko svake deoksiriboze su s okosnicom molekule povezane po jedna od četiri baze koje nazivamo adenin, timin, guanin i citozin (A, T, G, C). Njihov uzastopni slijed u molekuli DNK je upravo taj koji sadrži genetičku informaciju. Baza, zajedno s pripadajućim šećerom i fosfatom naziva se nukleotid i čini jedinicu svakog lanca te se duljina lanca molekule DNK može izraziti brojem nukleotida. Dva lanca molekule DNK u dvostrukoj uzvojnici spojena su upravo preko baza, putem vodikovih veza<sup>7</sup> koje se stvaraju između komplementarnih parova (Sl. 1). Timin se tako specifično sparuje s adeninom putem dvostruke vodikove veze (T=A), a citozin s guaninom putem trostruke (C≡G). Ovakvi se parovi označavaju kao komplementarni i broj parova baza (pb) je također mjera izražavanja duljine molekule DNK, odnosno količine DNK u stanici nekog organizma.

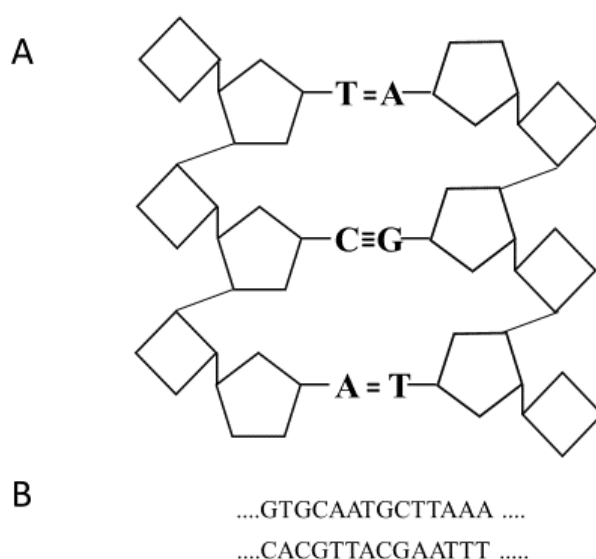
---

<sup>5</sup> Primjer miješanja osobina je nasljeđivanje boje cvijeta kod zijevalice, križanjem biljaka s bijelim i s crvenim cvjetovima dobit ćemo, u prvoj generaciji, biljke s ružičastim cvjetovima.

<sup>6</sup> Za ovo otkriće su Maurice Wilkins, Francis Crick i James Watson 1962. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziologiju ili medicinu, dok je ne manje značajna suradnica Rosalind Franklin umrla ranije, 1958. godine.

<sup>7</sup> Vodikove veze su slabe te omogućuju jednostavno razdvajanje parova baza, odnosno lanaca, npr. enzimima u stanici ili zagrijavanjem otopine molekule DNK u laboratoriju. Razdvajanje lanaca je reverzibilno te se vodikove veze i struktura dvostruke uzvojnice rekonstruiraju u cjelosti.





Sl. 1. A: Pojednostavljen shematski prikaz strukture molekule DNK. Peterokut označava šećer deoksiribozu, romb fosfatnu skupinu, a baze su označene slovima koja ih simboliziraju (objašnjenje u tekstu). Dvije i tri crtice između baza označavaju vodikove veze kojima se povezuju dva lanca molekule DNK. B: Prikaz kratkog segmenta nukleotidnog slijeda dvolančane DNK.

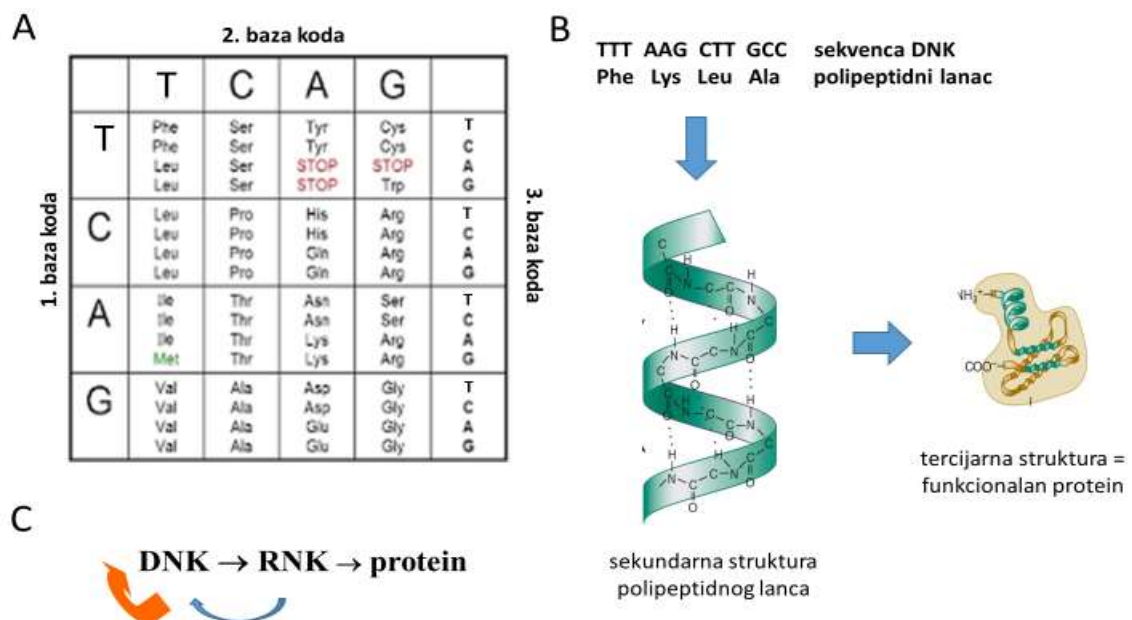
Informacija jednog lanca DNK sadržana je dakle kao komplementarna 'kopija' u drugom lancu. Ako znamo slijed nukleotida u jednom lancu, prema navedenim pravilima možemo jednostavno odrediti nukleotidni slijed drugog lanca (Sl. 1B). Ovo je ujedno osnova stanične diobe, jer se molekula DNK udvostručuje, odnosno replicira, tako da se prema svakom od dva lanca sintetizira novi komplementarni lanac pa su rezultat replikacije dvije identične molekule DNK koje se raspodjeljuju u novonastale stanice. Za analizu složene molekule DNK, a time i genetičkog nasljeđa, značajno je da se njena struktura može reducirati na ispis nukleotidnog slijeda koji se određuje postupkom sekvenciranja. S obzirom da se takav ispis prikazuje nizovima simbola baza A, G, C i T, pogodan je za računalnu analizu, od pohranjivanja i formiranja baza podataka, njihovog pretraživanja, uspoređivanja i slično<sup>8</sup>, što je u svakom slučaju daleko jednostavnije nego ukoliko bismo morali uspoređivati strukture molekula DNK u cijelosti. Upravo razvoj računarstva odnosno bioinformatičkih analiza i programiranja danas su presudni u genetičkim istraživanjima, a uz interdisciplinarnu suradnju, ovladavanje računalnim metodama postaje sve potrebnije biologima, ali i obrnuto, poznavanje osnova genetike postaje sve potrebnije stručnjacima u području bioračunarstva.

### 1.3. Geni i genetički kod

Gen se ukratko može definirati kao segment molekule DNK koji određuje građu nekog funkcionalnog produkta, a u najvećem broju slučajeva to su proteini (bjelančevine). To su radne molekule svakog organizma bilo da su prisutne kao enzimi koji kataliziraju biokemijske reakcije (npr. celulaza), kao strukturne molekule (npr. kolagen), kontraktilne (npr. miozin) ili hormoni (npr. inzulin). Osnovne gradivne jedinice proteina su aminokiseline kojih ima 20, a one u nizu formiraju lančaste

<sup>8</sup> Važna javna baza podataka za sekvence DNK je GenBank, dio *The National Center for Biotechnology Information* (NCBI), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/>

molekule polipeptida koje se potom u prostoru savijaju u složene 3-D strukture proteina, neophodne da bi molekula bila funkcionalno aktivna. Genetički kod<sup>9</sup> objašnjava kako 'jezik' DNK od 4 baze prevesti u 'jezik' proteina zasnovan na 20 aminokiselina. To je moguće jer po tri uzastopno poredana nukleotida (triplet) u molekuli DNK kodiraju jednu aminokiselinu, što daje  $4^3 = 64$  kombinacije, a to znači da postoji i više tripleta koji kodiraju istu aminokiselinu (Sl. 2). Ukoliko bi genetički kod bio zasnovan samo na dva uzastopna nukleotida, broj mogućih kombinacija je 16, što je premalo ukoliko proteine izgrađuje 20 aminokiselina. Važno je naglasiti da je genetički kod univerzalan za sve organizme na Zemlji što znači da se stabilizirao vrlo rano tijekom evolucije i potom se nije mijenjao. Evolucijsku stabilnost genetičkog koda tijekom postojanja života na Zemlji objašnjavamo složenošću biosinteze proteina, koja bi zahtijevala niz višestrukih istovremenih promjena da bi se, jednom uspostavljen, kod za jednu aminokiselinu zamijenio s nekim drugim. S druge strane, postojanost genetičkog koda se ne smije pomiješati s evolucijom gena, njihovih produkata i samih živih organizama, koji se mijenjaju, nastaju i nestaju tijekom dugih evolucijskih razdoblja tvoreći nove vrste i sve složenije organizacijske oblike<sup>10</sup>.



Sl. 2. A: Tablica genetičkog koda. Aminokiselina metionin (Met, zeleno) ujedno je signal za početak sinteze polipeptidnog lanca. Postoje tri signala za zaustavljanje (crveno). B: U novosintetiziranom polipeptidnom lancu niz aminokiselina tvori sekundarnu strukturu koja se smatra u tercijsku, koja je funkcionalni protein. C: Tijekom genetičke informacije ide od DNK preko ribonukleinske kiseline (RNK) kao intermedijera do proteina. DNK se replicira, a u pojedinim slučajevima informacija iz RNK se može prepisati nazad u DNK.

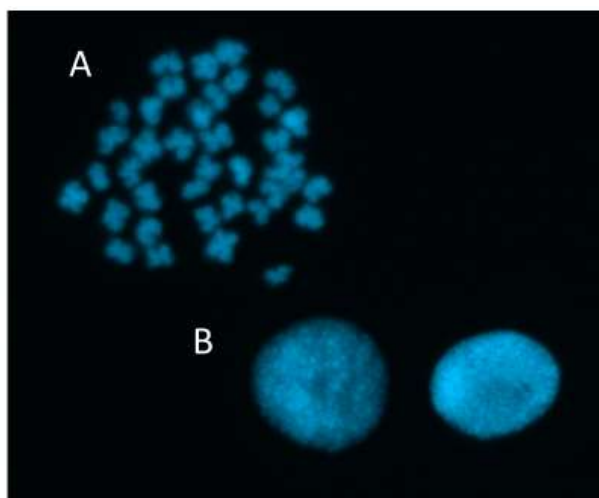
## 2. Neka pitanja, zagonetke, problemi i zablude

### 2.1. Pitanja i zagonetke: veličina genoma

<sup>9</sup> Za rad na razjašnjavanju kodiranja i sinteze proteina Marshall Nirenberg, Har Khorana i Robert Holley su 1968. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziologiju ili medicinu.

<sup>10</sup> Npr., kralješnjaci su se razvili iz jednostavnijih oblika (svitkovci, beskralješnjaci) mijenjanjem postojećih i pojavom novih gena, ali svi ovi organizmi, i izumrli i postojeći, koriste isti genetički kod

Pojam genom označava cjelokupnu genetičku informaciju, odnosno sveukupnu DNK u stanici nekog organizma. Već su prva mjerenja polovicom prošlog stoljeća pokazala da su genomi višestaničnih organizama neočekivano veliki [6] te da njihova organizacija značajno odstupa od jednostavne predodžbe o genomskoj DNK kao nizu gena, njihovih regulatornih elemenata i duljih ili kraćih 'razmaknica', kako se pokazalo uobičajenim kod bakterija. Tako stanice čovjeka sadrže 6,27 Gpb (giga parova baza odnosno 6,5 pikograma) molekule DNK ukupne duljine oko 2 m, raspodijeljene u 46 kromosoma (22 para autosomnih i jedan par spolnih kromosoma, XX, ili XY). Ova ogromna količina DNK je učinkovito pakirana i funkcionalna u staničnoj jezgri promjera 5-20  $\mu\text{m}$  zahvaljujući asocijaciji s proteinima. Strukture koje u svjetlosnom mikroskopu vidimo kao kromosome predstavljaju oblik maksimalno kondenziranih molekula DNK koji omogućuje pravilno razdjeljivanje u staničnoj diobi. Isti organizacijski princip vrijedi za sve višestanične organizme (Sl. 3).



Sl. 3. A: Kromosomi školjkaša *Donax trunculus* u metafazi, tj. prije razdvajanja u staničnoj diobi. B: u dekonenziranom obliku u jezgrama stanica koje se ne dijele. DNK je obojena flourecencijskom bojom DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol) i snimljena fluorecencijskim mikroskopom pod svjetlošću odgovarajuće pobudne valne duljine.

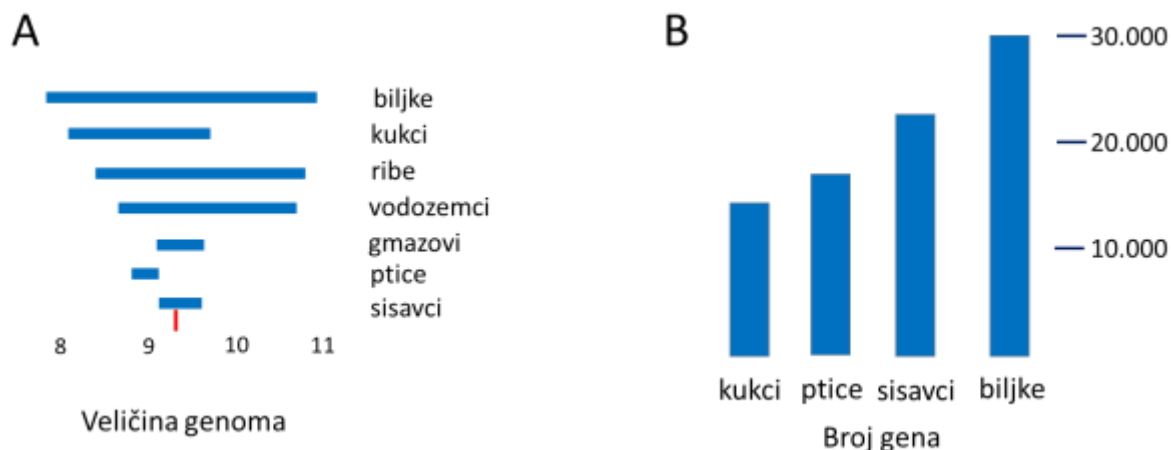
Veličina genoma jako se razlikuje među vrstama, međutim ne postoji korelacija između veličine genoma i složenosti organizma, što se označava kao zagonetka C-vrijednosti<sup>11</sup>. Razlika u veličini genoma, ne računajući bakterije, može doseći i 80.000 puta. Veličina genoma čovjeka približno je na sredini te skale tako da postoje brojni organizmi s većim genomom, kao na primjer, mnoge ribe, vodozemci, ili biljke (Sl. 4). Posljedice ovih razlika nisu ni do danas sasvim jasne, ali vjerojatno imaju vezu sa sposobnošću prilagođavanja na promjenu uvjeta u okolišu.

Međutim, veći genom ne implicira nužno i veći broj gena. Prosječna duljina gena nije velika i iznosi približno 1000-2000 pb, dok je genom daleko veći, kao što je objašnjeno u prethodnom odlomku. U 40-tim godinama prošlog stoljeća, Hermann Muller<sup>12</sup>, na osnovi pokusa mutageneze izazvane X-

<sup>11</sup> Stariji naziv bio je paradoks C-vrijednosti. 'C' potječe od engl. riječi *constant* (ili prema nekima od engl. riječi *characteristic*) s obzirom da je, uz poneke iznimke, veličina genoma ista, odnosno svojstvena svim stanicama nekog organizma i vrste.

<sup>12</sup> Hermann Muller (1890 – 1967), genetičar, radio je na mutagenezi uzrokovanoj zračenjem, a 1946. dobio je Nobelovu nagradu za fiziologiju ili medicinu.

zrakama te John Haldane<sup>13</sup> zaključili su da tek mali postotak ljudskog genoma sadrži funkcionalne elemente DNK, odnosno gene, koji mogu biti pogođeni mutacijama. Danas znamo da je udio gena (zajedno s njihovim regulatornim sekvencama) u genomu čovjeka manji od 2%, a slično vrijedi i za ostale višestanične organizme.



Sl. 4. A: Usporedba raspona veličina genoma u nekim vrstama. Crvena crtica kod sisavaca označava približnu veličinu genoma čovjeka. Skala je eksponencijalna, izražena u broju parova baza u spolnim stanicama. B: Približan broj gena kod nekih skupina organizama.

## 2.2. Nedoumice i zablude: 'višak' DNK

S obzirom da se još u 60-tim godinama prošlog stoljeća smatralo kako geni nose informaciju koja je sama po sebi dovoljna za funkcioniranje organizma u cjelini, spoznaja o tomu da čak >98% genoma nisu geni činila se vrlo zbunjujućom, kao i razlike u veličini genoma opisane u prethodnom poglavlju. Postavilo se dakle logično pitanje zašto uopće postoji i nasljeđuje se 98% genoma, s obzirom da je održavanje i nasljeđivanje ove mase DNK nesumnjivo vrlo zahtjevno za stanične resurse. Otprilike u istom desetljeću, u okviru svojeg viđenja, von Beralanffy na raznim mjestima u knjizi [1] komentira genetička istraživanja i razumijevanje funkcije i regulacije funkcije gena na način koji se pokazao gotovo u potpunosti u skladu s današnjim shvaćanjem složenosti genoma<sup>14,15</sup>.

Već su rana istraživanja pokazala da dominantnu genomsku frakciju u najvećoj mjeri predstavljaju motivi ili osnovne jedinice koje se ponavljaju, od kojih neke i po više stotina tisuća puta. Same jedinice ponavljanja obično su kratke, uglavnom ne dulje od tisuću pb i nemaju potencijal za kodiranje [7]. Pojavile su se dvije hipoteze. U prvoj se već tada tvrdilo da sve sekvence DNK u genomu moraju imati bar neku ulogu pa tako i ponovljene sekvence DNK. Pojedini autori su pretpostavili da se radi o 'strukturnoj DNK' kako su je nazvali, koja je neophodna u formiranju strukture i organizacije

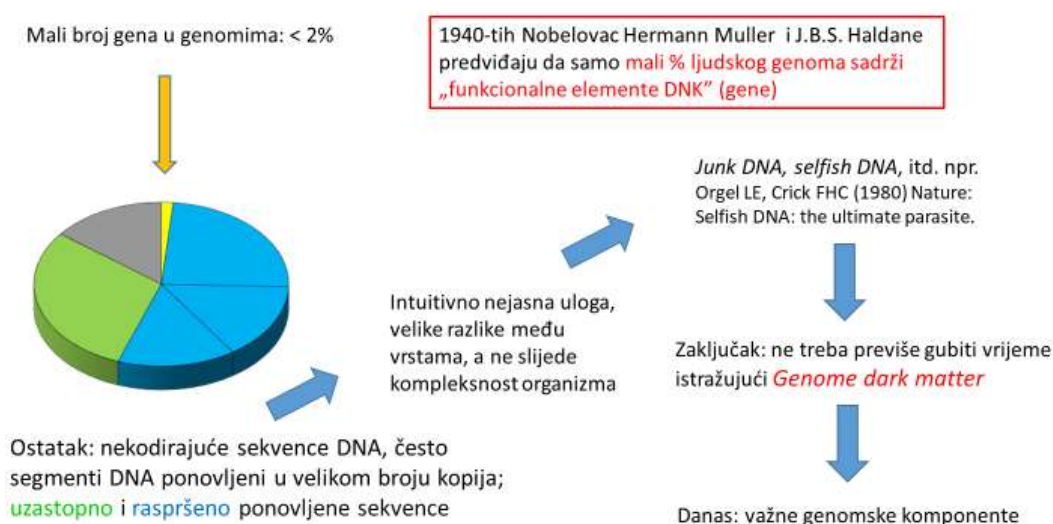
<sup>13</sup> John B. S. Haldane (1892 – 1964), fiziolog, genetičar, evolucijski biolog i matematičar, jedan od utemeljitelja populacijske genetike.

<sup>14</sup> Stranica 166: 'Mendelovi zakoni bili su korijeni genetike, ali – nasljednost, križna razmjena, učinak položaja koda i još mnogo toga – bio je to samo mali dio genetičkog iskustva koje se može opisati klasičnim zakonima.'

<sup>15</sup> Stranica 63: '...genom kao cjelina proizvodi organizam kao cjelinu. Određeni geni, međutim, u prvom redu određuju smjer razvoja određenih značajki – tj. djeluju kao 'glavni dijelovi'. To se očituje u mišljenju da je svako nasljedno svojstvo suodređeno mnogim, možda i svim genima, i da svaki gen utječe ne samo na jedno svojstvo nego vjerojatno i na cijeli organizam.'

kromosoma, stanične jezgre i u evoluciji vrsta [8]. Pokazalo se da je ova pretpostavka zasnovana na logičnom zaključivanju također vrlo bliska današnjim shvaćanjima.

Međutim, tijekom nekoliko desetljeća dominirala je konceptijski suprotna pretpostavka (sl. 5). Na osnovu nepoznavanja strukture i funkcije te zbog intuitivno nejasne uloge ponovljenih sekvenci DNK pretpostavljeno je da one niti nemaju ikakvu spomena vrijednu biološku funkciju, već da jednostavno predstavljaju nepotreban višak u genomima koji se može tolerirati tako dugo dok ne postane preveliki teret za stanične mehanizme. Donekle je to i točno, DNK se ne može gomilati u staničnoj jezgri neograničeno, ali daleko od toga da postojeća količina predstavlja višak bez uloge, kao što ćemo vidjeti u nastavku. Zagovornici ove hipoteze pretpostavljali su da se radi o DNK 'otpadu' [9], odnosno o DNK koja postoji na račun funkcionalnog dijela genoma neke vrste, kao savršeni parazit [10]. Jedan od autora bio je i Francis Crick, dobitnik Nobelove nagrade za otkriće strukture molekule DNK. Dakako da ovakve hipoteze, poduprte od vrhunskih znanstvenika, nisu mogle djelovati stimulativno na opsežno i detaljno istraživanje ove genomske frakcije, jer zaključak je jasan, ne treba gubiti vrijeme istražujući nešto što ne služi ničemu. Posljedično su ti, tada neistraženi dijelovi genoma, dobili naziv i tamna materija genoma. Tek razvojem učinkovitih visokoprotlačnih<sup>16</sup> metoda sekvenciranja molekule DNK, pohrane podataka i bioinformatičkih analiza te s obzirom na postupno osvješćivanje o ulogama ovakvih sekvenci DNK došlo je do značajnog pomaka u interesu za istraživanjem i razumijevanjem strukture i uloge ponovljenih sekvenci DNK [11].



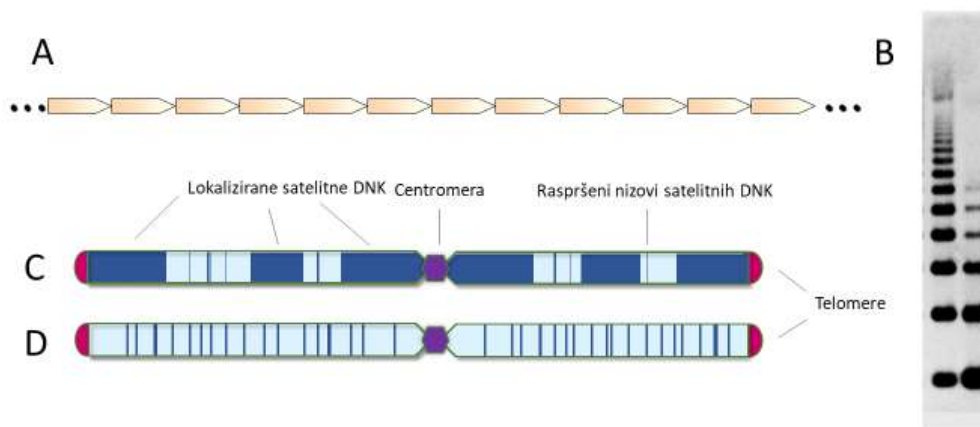
Sl. 5.: Tipičan udio sekvenci DNK u višestaničnim organizmima i sažetak razvoja shvaćanja o ulozi ponovljenih sekvenci DNK.

## 2.3. Genomska tamna materija: ponovljene sekvence DNK

Ponovljene sekvence DNK dijele se u dvije osnovne skupine, uzastopno ponovljene, kod kojih se osnovne jedinice nadovezuju jedna na drugu, većinom u dugim nizovima [12] i one koje su po genomu raspršene kao pojedinačne kopije [13]. I u jednoj i u drugoj skupini postoji veliki broj različitih tipova sekvenci, uključivo i hibridnih oblika, a zajedno mogu izgrađivati i >70% genoma. Ostatak čine jedinstvene sekvence nepoznate uloge (sivi odsječak na Sl. 5).

<sup>16</sup> Engl. *high-throughput*

Uzastopno ponovljene sekvence tradicionalno se nazivaju satelitne DNK<sup>17</sup>, a uglavnom su prisutne u dugim homogenim nizovima (duljine i nekoliko stotina tisuća pb) koji su lokalizirani u određenim genomskim (odnosno kromosomskim) odjeljcima (Sl. 6). Na primjer, redovito ih nalazimo u funkcionalno značajnim centromernim područjima, odgovornim za pravilno razdjeljivanje kromosoma u staničnoj diobi. Novija istraživanja pokazala su da se u nekim vrstama satelitne DNK mogu nalaziti i raspršene po genomu u obliku relativno kratkih nizova uzastopnih ponavljanja [14, 15]. Evolucijska osobina satelitnih DNK je brza promjena u broju kopija i postojanje velikih razlika u sastavu i sadržaju satelitnih DNK već među blisko srodnim vrstama.



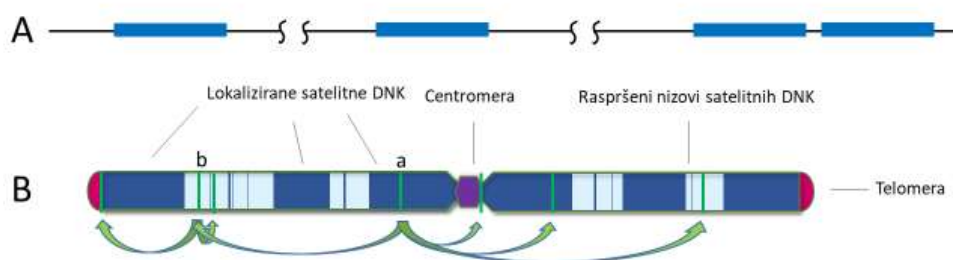
Sl. 6. A: Shematski prikaz satelitne DNK. Jedinice koje se ponavljaju, monomeri, nadovezuju se jedan na drugi. B: Djelomična enzimatska razgradnja ovakvih nizova pokazuje tipičnu ljestvičastu strukturu kada se fragmenti DNK razdvoje u električnom polju (molekula DNK je negativno nabijena). Najniže pruge predstavljaju monomere, sljedeće dimer pa trimer itd. C: Satelitne DNK tipično su lokalizirane velikim blokovima u pojedinim dijelovima kromosoma, uključivo i u centromernom i telomernom području. Izdvojene poprečne crte na svijetloj podlozi predstavljaju raspršene kratke nizove satelitnih DNK. D: Alternativni organizacijski oblik u kojem postoje samo relativno kratki nizovi satelitnih DNK raspršeni po cijelom kromosomu.

Druga skupina, raspršeno ponovljene sekvence DNK, nastaje širenjem pokretnih genetičkih (transponirajućih) elemenata (Sl. 7). To su segmenti genomske DNK koji imaju sposobnost premještanja i ugradnje na nove genomske lokacije, bilo izrezivanjem samog elementa i ugrađivanjem na novi položaj, bilo kopiranjem izvornog elementa i ugrađivanjem kopije na novo mjesto [13, 16]. Ovi elementi mogu 'povući' sa sobom i dovesti do premještanja i segmente genomske DNK koja nije njihov sastavni dio (uključivo i gene), a povećanjem broja kopija utječu i na veličinu genoma. Sama ideja da postoje elementi koji već u slijedećoj generaciji mogu dramatično promijeniti genomsku strukturu činila se dugo vremena neprihvatljivom jer je u potpunosti mijenjala predodžbu o genomu kao stabilno uređenoj cjelini<sup>18</sup>. Danas smatramo da ovi elementi, zajedno sa satelitnom DNK kao i brojnim prijelaznim oblicima između ovih dviju skupina predstavljaju glavne pokretače promjena u genomu, a time i evolucije genoma.

<sup>17</sup> U 60-tim godinama prošlog stoljeća fragmentirana genomska DNK istraživala se pokusima centrifugiranja pri velikim brzinama, na kojima se formira gradijent gustoće otopine cezijeveog klorida u kojemu svaka genomska frakcija ima gustoću plutanja ovisno o zastupljenosti G-C (težih) i A-T (lakših) parova baza. Satelitne DNK su često A-T bogatije u odnosu na glavninu genomske DNK pa imaju drugačiju gustoću plutanja.

<sup>18</sup> Pokretne genetičke elemente, tada nazvane i *jumping genes*, otkrila je 1950. godine Barbara McClintock (1902-1992) istraživanjem regulacije gena kukuruza, čime je prva dokazala dinamičnu strukturu genoma. Uglavnom zbog nerazumijevanja novog koncepta, njezini rezultati su bili sporo prihvaćeni. Nobelovu nagradu za fiziologiju ili medicinu dobila je 1983. godine.





Sl. 7. A: Pokretni genetički elementi raspršeni su po genomu pojedinačno ili u nakupinama. B: Mogu se naći u svim dijelovima kromosoma (zelene poprečne crte). Kao u lančanoj reakciji, element (a) može se nastaviti širiti i s nove lokacije (b). Ugradnja elementa mijenja strukturu svih kromosoma i genoma u cjelini, a povećanjem broja kopija može se značajno povećati veličina genoma.

### 3. Problemi genomskih projekata

#### 3.1. Genomski projekti i broj gena

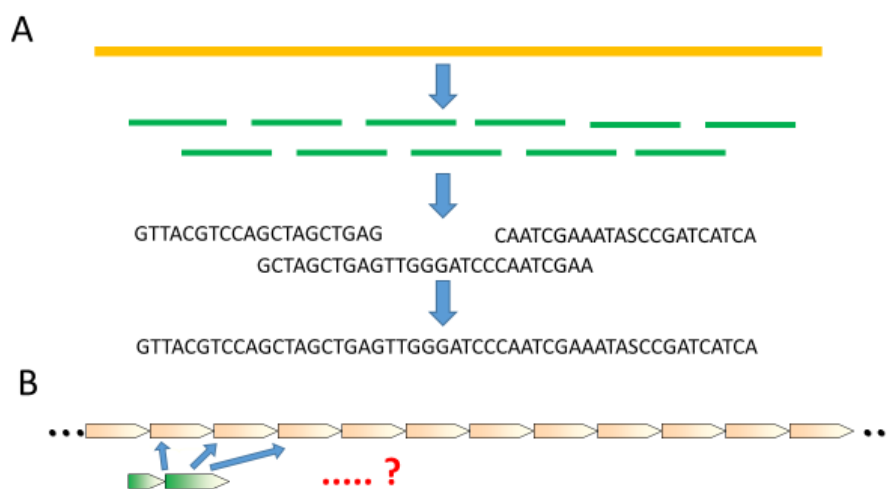
Razvoj metodologije sekvenciranja molekule DNK kao i sve veće mogućnosti pohranjivanja podataka i njihove obrade doveli su do ideje o određivanju nukleotidnog slijeda cjelokupne DNK nekog organizma. Tako je 1990. godine pokrenut projekt sekvenciranja ljudskog genoma kako bi se odredio cjelokupni nukleotidni slijed koji ga izgrađuje, a s glavnim ciljem određivanja broja kao i uloge svakog gena i njihovih regulatornih elemenata. Pretpostavljeni broj gena kod čovjeka dugo je vrijeme bio predmet rasprava. Jedna struja je smatrala da broj gena čovjeka mora biti daleko veći nego što je već kod najbližeg srodnika u životinjskom svijetu. Tako se u 70-tim godinama spekuliralo da bi ljudski genom mogao sadržavati čak i nekoliko milijuna gena. Mislilo se da su sva svojstva čovjeka, a osobito ona vezana uz funkcije mozga (što bi trebalo uključivati i sklonosti i obrasce u ponašanju) definirani genima, kojih bi onda trebalo biti puno više nego kod drugih vrsta. Detaljnija istraživanja pokazala su međutim da to nije tako pa je pretpostavljeni broj gena kod čovjeka u trenutku pokretanja genomskog projekta bio između 110.000 i 150.000. Objavljivanjem prve verzije genoma čovjeka 2001. godine [17], ova procjena je smanjena na 30.000 – 35.000 gena, da bi se naknadna detaljnija istraživanja do oko 2006. godine zaustavila na oko 22.000 gena, potvrdivši tako ranije pretpostavke da je genom velik, a udio gena u njemu malen. Sekvenciranje genoma drugih organizama donijelo je međutim nova iznenađenja, jer se npr. vidjelo da i genomi svih vrsta sisavaca sadrže podjednak broj gena, oko 22.000. Naravno, između pojedinih vrsta geni su djelomično različiti, a razlike su i u njihovoj genomskoj organizaciji. Ali sve u svemu, pokazalo se da se broj gena značajnije smanjuje tek kod evolucijski znatno udaljenijih vrsta životinja, dok biljke često imaju i znatno veći broj gena, predvidivo zbog složenih biosintetskih puteva (Sl. 4B).

Gotovo istovremeno s objavljivanjem rezultata genomskog projekta čovjeka i nekih drugih modelnih organizama pojavila su se razmišljanja kako prepoznavanje samih sekvenci gena i njihovih regulatornih sekvenci nije ni približno dovoljno da bi se razumjelo funkcioniranje organizma kao cjeline. Na ovom mjestu treba podsjetiti na teoretska i filozofska razmišljanja von Bertalanffya o organizmičkom (integrativnom) pristupu u istraživanju bioloških sustava iznesena na početku ovog teksta. Na primjer, veliki sklopovi od po možda i nekoliko tisuća gena uključuju se i isključuju u određenim fazama razvoja, ili života organizma [18]. Pa tako autori navedenog rada između ostalog kažu: 'Unatoč svim slavljinama povezanim sa sekvenciranjem ljudskog genoma i genoma drugih

modelnih organizama, naše sposobnosti tumačenja genomskih sekvenci prilično su ograničena.' Također postavljaju pitanje 'Kako se velike razlike u aktivnostima gena u velikom broju staničnih tipova uspostavljaju i održavaju da bi osigurale razvoj i funkcioniranje složenog višestaničnog organizama?'<sup>19</sup>. Da bi se odgovorilo na ova i slična pitanja potrebno je poznavati strukturu i funkciju cjelokupnog genoma, sa svim njegovim elementima i na svim razinama, uključivo i strukturu i ulogu genomske tamne materije.

### 3.2. Genomski projekti i genomska tamna materija

Ponovljene sekvence DNK dugogodišnji su kamen spoticanja u interpretaciji strukture, funkcije i evolucije genoma višestaničnih organizama i prepreka određivanju cjelokupnog nukleotidnog slijeda u genomu. Ova genomska frakcija najčešće nedostaje u rezultatima genomskih projekata. Na primjer, eksperimentalnim metodama i kloniranjem utvrđeno je kako glavna satelitna DNK kukca *Tribolium castaneum* izgrađuje 17% genoma dok u prvoj verziji sastavljenog genoma ovog kukca ona predstavlja tek manje od 0,5% [14]. Slično je i s prvom verzijom genoma čovjeka iz 2001. godine, kao i sa svim drugim sekvenciranim i sastavljanim genomima, što jednostavno znači da su nepotpuni, odnosno rekonstruirani samo fragmentarno. Uzrok tomu su poteškoće u sekvenciranju i preklapanju segmenata genomske DNK kada se radi o ponovljenim sekvencama (Sl. 8). S obzirom da se jedinice uzastopno ponovljene sekvence međusobno razlikuju vrlo malo (< 5%) i prisutne su u velikom broju kopija, uobičajenom metodom sekvenciranja<sup>20</sup> gotovo je nemoguće točno orijentirati i preklopiti fragmente u originalni slijed i odrediti s koje točno lokacije u genomu potječu. Dodatno, zanemarivanju ponovljenih sekvenci pogodovalo je i sada zastarjelo mišljenje da se radi o potpuno beskorisnim genomskim dijelovima.



Sl. 8. A: Osnovni princip sekvenciranja genoma. Genomska DNK (žuta linija) nasumično se razgradi na fragmente DNK duljine pogodne za sekvenciranje (zeleno). Preklapanjem sekvenciranih segmenata može se rekonstruirati originalni fragment. B: Sekvencu u nizovima ponovljene DNK nemoguće je rekonstruirati na ovaj način, jer je nemoguće pravilno preklopiti fragmente ponavljanja koja se između sebe razlikuju samo u nekoliko nukleotida.

<sup>19</sup> Oba navoda s engleskog preveo MP.

<sup>20</sup> Najčešće se koristila, a i danas se često koristi metoda sekvenciranja prema Sangeru, kojom se određuje nukleotidni slijed fragmenata DNK duljine od oko 500 pb (prva generacija sekvenciranja). Metoda je razvijena 1977. godine, a za to postignuće Frederick Sanger (1918 – 2013) je 1980. godine dobio Nobelovu nagradu za kemiju i to po drugi put, prvu je dobio 1958. godine za određivanje aminokiselinskog slijeda u inzulinu.



Razvoj sljedeće generacije sekvenciranja<sup>21</sup> omogućilo je značajan napredak u istraživanju ponovljenih sekvenci DNK. Ovom metodom sekvenciraju se kratki fragmenti genomske DNK koji se putem specifično razvijenih algoritama i bioinformatičkih alata grupiraju prema sličnosti i zastupljenosti u genomu što omogućuje određivanje ukupnog sadržaja svih ponovljenih sekvenci DNK u nekom organizmu, nazvan *repeatom* [19]. Ovaj pristup pokazao je veliku raznolikost među pojedinim vrstama. Tako samo satelitnih DNK u genomu može biti od nekoliko do > 200 različitih, a također se razlikuju i u zastupljenosti, rasporedu i rasprostranjenosti po kromosomima [15]. Prednost ovakve analize je da nije vezana uz postojanje sekvenciranog i sastavljenog genoma, a nedostatak je da daje samo sadržaj ponovljenih sekvenci, ali ne i njihov točan linearan raspored. Osim ovog pristupa, razvijen je također i cijeli niz računalnih programa specijaliziranih za detaljno pretraživanje i analizu sekvencirane genomske DNK [20]. Kombinacijom različitih metoda nastoji se dobiti što cjelovitija slika genomske tamne materije.

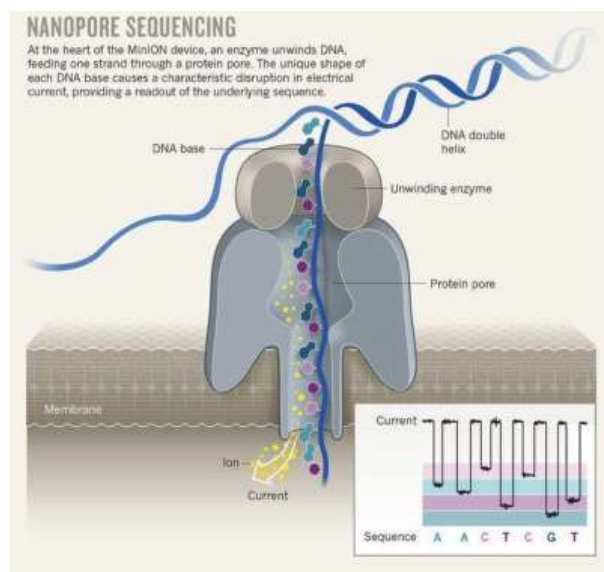
Treća generacija sekvenciranja (čitanje dugih fragmenata)<sup>22</sup> je tehnologija koja je postala široko dostupna oko 2015. godine, a i dalje se intenzivno razvija. Ovakvim sekvenciranjem moguće je čitanje molekula DNK duljine i >300.000 pb u neprekinutom slijedu, čime je olakšano preklapanje pročitanih segmenata. Ovo je omogućilo sastavljanje sekvence DNK cijelog kromosoma, od telomere do telomere (T2T)<sup>23</sup>. U proučavanju satelitnih DNK ovom tehnologijom je dobrim dijelom izbjegnuta problem sastavljanja segmenata DNK koji se sastoje od međusobno sličnih jedinica ponavljanja [11, 21]. Radi potpune slike i boljeg popunjavanja 'praznina' istovremeno se i dalje koriste metode prve i druge generacije. Koristeći nanopornu tehnologiju (Sl. 9) konzorcij T2T uspio je kompletirati sekvencu ljudskog genoma 2022. godine (uz relativno mala područja koja su još uvijek neodređena), 21 godinu nakon objavljivanja prve verzije. Ovim projektom dodano je oko 200 Mpb do tada nesekvencirane DNK, ispravljene su brojne strukturne greške te razriješena neka složena područja značajna za biomedicinska i funkcionalna istraživanja [22]. Tako su na kromosomima čovjeka pročitana i centromerna područja, koja se u ovom slučaju sastoje od dugih nizova složeno organiziranih varijanti ponovljene sekvence poznate kao  $\alpha$  satelitna DNK. Danas se sve više vrsta uključuje u ovakvo, do sada najkompletnije, određivanje ukupnog nukleotidnog slijeda u genomu nekog organizma.

---

<sup>21</sup> Engl. *next generation sequencing* (NGS), odnosno druge generacije, omogućuje istovremeno procesiranje velikog broja uzoraka (engl. *high-throughput*), ali u kratkim očitanjima (obično oko 150 pb). Ove tehnologije postale su dostupne početkom ovog stoljeća.

<sup>22</sup> Engl. *third-generation sequencing, long-read sequencing*. Do sada su najpoznatije metode koje koriste Pacific Biosciences (PacBio) i Oxford Nanopore Technologies (ONT).

<sup>23</sup> Telomere predstavljaju kromosomske krajeve, sastavljanje kromosoma od kraja do kraja naziva se engl. *telomere to telomere assembly*, T2T.



Sl. 9.: Princip sekvenciranja kroz proteinske nanopore zasniva se na detekciji promjena u električnoj struji, koja se mijenja specifično prema obliku svake baze koja prolazi kroz poru. Preuzeto sa stranice <https://nxtgnt.ugent.be/nanopore-sequencing/>.

### 3.3. Koja je uloga genomske tamne materije?

Pojačan interes za istraživanjem ponovljenih sekvenci DNK pokazao je i njihove brojne uloge, koje su ključne u organizaciji, funkciji i evoluciji genoma višestaničnog organizma kao cjeline. Tako pokretni genetički elementi svojim premještanjem mogu dovesti do genomske pregradnje, kopiranjem nekog gena i njegove ugradnje na novu lokaciju otvaraju put novoj regulaciji ili, naknadnim mutacijama, nastanku promijenjenog gena s mogućom novom ulogom. Pokretni elementi mogu se ugraditi i u sam gen, inaktivirati ga, ili, kao u nekim slučajevima promijeniti mu strukturu ili regulaciju. U mnogim genima i njihovim regulatornim sekvencama vide se ostaci ugradnje pokretnih genetičkih elemenata, a mogu i sami poslužiti kao regulatorne sekvence. Genom posjeduje mehanizme kojim se širenje pokretnih genetičkih elemenata može utišati, a opaženo je da ovakve 'kočnice' popuštaju u promijenjenim ekološkim uvjetima. To vjerojatno predstavlja način 'destabilizacije' genoma u nepovoljnim uvjetima kao što su klimatske promjene. Uvjeti u okolišu na taj način pokreću promjene u genomima od kojih neke mogu biti pozitivne u smislu bolje prilagodbe [23]. Širenje pokretnih genetičkih elemenata može značajno promijeniti veličinu genoma što može promijeniti kromosomsku arhitekturu i dovesti do reproduktivne izolacije među jedinkama, što je preduvjet nastanku novih vrsta<sup>24</sup>.

Satelitne DNK su posebno zagonetne u svojoj ulozi, između ostalog, jer je na njima teško raditi bilo kakvu mutagenezu i funkcionalna istraživanja. Danas međutim znamo da su značajne kao elementi arhitekture, stabilnosti i evolucije kromosoma. To su najčešći oblici sekvence DNK u ključnim dijelovima kromosoma, centromernim (stanična dioba) i telomernim (kromosomski krajevi), u kojima predstavljaju funkcionalne elemente na koje se vezuju proteinske komponente. Sudjeluju u procesima kojima se regulira stupanj kondenzacije molekule DNK, čime pak izravno sudjeluju u regulaciji genske

<sup>24</sup> Biološku vrstu možemo definirati kao skup jedinki koje se mogu međusobno križati i stvarati fertilno potomstvo.

ekspresije. Sudjeluju u strukturiranju stanične jezgre<sup>25</sup> [18]. Također imaju ulogu i u odgovoru na stres, starenje, u genomskim reorganizacijama i evoluciji [24]. Zbog brze evolucije prvenstveno u sadržaju i broju kopija također su važne u stvaranju reproduktivne izolacije među jedinkama te nastanku novih vrsta [25]. Promjene u broju kopija pojedinih satelitnih DNK važne su u patološkim stanjima, uključivo nastanku nekih oblika tumora [26]. Uključivo mogu utjecati i na ponašanje. Proučavanje genoma prerijskih i planinskih populacija južnoameričke voluharice pokazalo je da duljina niza uzastopno ponovljenog motiva ispred samo jednog gena<sup>26</sup> ima utjecaj na socijalno ponašanje. Naime, o duljini ovog niza ovisi monogamno ili poligamno ponašanje mužjaka, odabir partnerice, čuvanje nastambe i teritorijalnost [27].

### 3.4. Dodatne razine genetičke informacije

Za pravilno funkcioniranje genoma sam nukleotidni slijed i raspored sekvenci DNK, iako složen, nije dovoljan. Važnu dodatnu razinu informacije čine tzv. epigenetičke modifikacije. Kemijskim promjenama na bazama kao što je metilacija<sup>27</sup> ne mijenja se sama sekvenca DNK, ali ovakve promjene mijenjaju aktivnost gena u segmentu DNK u kojem se nalaze. Tako na primjer dodavanje metilne skupine na citozine u području kojim se regulira aktivnost gena obično dovode do utišavanja tog gena. Metilacijom velikih područja mogu se inaktivirati cijeli kromosomi, na primjer jedna od dvije kopije kromosoma X kod ženki sisavaca. Također, ovim mehanizmom se regulira aktivnost pokretnih genetičkih elemenata, metilacija blokira njihovo širenje. Različite modifikacije mogu se dodati i proteinima koji omogućavaju pakiranje molekule DNK u kromatin, čime se također utječe na aktivnost gena. Osim metilne skupine to mogu biti i druge kemijske skupine, a zajedničko im je da sve utječu na genetičku informaciju u modificiranom dijelu genoma, svaka na svoj način. Ovakve promjene mogu biti dio redovne regulacije dijelova genoma (aktivnost/utišanost), ali i stečene kako bi se poboljšale prilagodbe na uvjete života (npr. stres, starenje, patološka stanja). U određenim slučajevima mogu se i nasljeđivati, ali mogu biti i uklonjene, čime se vraća prvobitna uloga danog segmenta DNK. Postoje složeni enzimatski mehanizmi kojim se reguliraju epigenetičke modifikacije, a sve epigenetičke promjene zajedno u nekom organizmu označavaju se kao epigenom. Nadalje, smatra se da i sama strukturna svojstva molekule DNK mogu biti informativna, na primjer tipična struktura dvostruke uzvojnice može biti promijenjena u svojim pojedinim djelovima kao posljedica različitih specifičnosti u kratkim segmentima nukleotidnog slijeda.

## Zaključak

Racionalnost je odlika bioloških sustava u kojima uložena materija i energija mora biti opravdana i donijeti bar neku prednost u neprestanoj kompeticiji tijekom evolucije. Nema razloga da se ovakvo razmišljanje ne primijeni i na genome višestaničnih organizama, koji na prvi pogled djeluju preopterećeni velikom količinom ponovljenih sekvenci DNK<sup>28</sup>. Već intuitivnim razmišljanjem je stoga teško zamisliti da bi se većina genomske DNK održavala i pravilno nasljeđivala tek tako, sebe radi. Zahvaljujući napretku u tehnologiji i bioinformatici tijekom približno zadnja dva desetljeća dogodio se

---

<sup>25</sup> U stanici koja se ne dijeli (interfaza) kromatinske niti koje tvore kromosome manje su kondenzirani, a smještene su u staničnoj jezgri. Ovako opušteni kromosomi u jezgri nisu nasumično ispremišani, već tvore „kromosomske teritorije“ koji se u jezgri nalaze u određenom rasporedu.

<sup>26</sup> Radi se o genu za neuropeptidni vazopresinski receptor 1a u mozgu.

<sup>27</sup> Metilna skupina CH<sub>3</sub> dodaje se bazama citozinu (C) i adeninu (A) na točno određena mjesta, čime se mijenjaju svojstva molekule DNK u tom dijelu.

<sup>28</sup> Što je značajna razlika u odnosu na bakterijske genome, kod kojih takav 'višak' jednostavno ne postoji.

kvantni skok u razumijevanju uloge ovih sekvenci DNK na višoj razini genomske organizacije, odnosno definiranju genomske arhitekture, funkcije i evolucije. U viđenju opće teorije sustava može se očekivati upravo ovakav rasplet analize 'suvišnih' genomskih komponenti, jer sve predstavljaju djelove jednog cjelovitog sustava, od molekularnih struktura i interakcija do organizma, populacija, interakcija među jedinkama i s okolišem. U tom je smislu vrijednost organizmičkog razmišljanja von Bertalanffya prepoznata i danas [2]. No i sadašnje poznavanje genomske strukture, funkcije i evolucije i dalje je nepotpuno, a nova istraživanja će nesumnjivo ići u smjeru multidisciplinarnosti i integracija kako bi se još bolje razumjela cjelina. Sve više se tako pokazuje i utjecaj okoliša na promjene u genomima i genomsku evoluciju. Time se postavlja i pitanje smislenosti intervencija u složenim prirodnim sustavima ukoliko se ne promatraju i razumiju u cjelosti, jer, u skladu s općom teorijom sustava, rješenja ponuđena za jedan problem mogu samo uvesti u drugi, još ozbiljniji.

## Zahvala

Najljepše zahvaljujem prof. Franji Joviću na pozivu za sudjelovanjem na 11. simpoziju PIFT-a 2023. i poticaju za pripremu ovog članka te dr.sc. Evi Šatović-Vukšić s Instituta Ruđer Bošković na pomoći u izradi dijela slika i na kritičnom čitanju teksta.

## Literatura

- [1] L. von Bertalanffy, *Opća teorija sustava: osnove, razvoj, primjene*, Kiklos – krug knjige, Zagreb, Hrvatska, lipanj 2022.
- [2] D. Hammond, The legacy of Ludwig von Bertalanffy and its relevance for our time, *Systems Res. and Behavioral Sci.*, 36 (3), svibanj/lipanj 2019, stranice 301-307, posebno izdanje: Ludwig von Bertalanffy: legacies, traces, reverberations and amplifications. Commemorating the man and the work 50 years after 'General System Theory', <https://doi.org/10.1002/sres.2598>.
- [3] N. Brunner, M. Kühleitner, K. Renner-Martin. Bertalanffy-Pütter models for avian growth, *PLoS One*, 16(4), travanj 2021, e0250515, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250515>.
- [4] M. Kühleitner, N. Brunner, W.G. Nowak, K. Renner-Martin, K. Scheicher. Best fitting tumor growth models of the von Bertalanffy-Pütter Type, *BMC Cancer*, 19(1) srpanj 2019, 683, <https://doi.org/10.1186/s12885-019-5911-y>.
- [5] J.D. Watson, F.H. Crick, Molecular structure of nucleic acids; a structure for deoxyribose nucleic acid, *Nature*, 171(4356), travanj 1953, 737-738, <https://doi.org/10.1038/171737a0>.
- [6] R. Vendrely, C. Vendrely, The content of deoxyribonucleic acid in the cell nucleus through organs, individuals and animal species: techniques and first results, *Experientia*, 4(11), studeni 1948, 434-436, <https://doi.org/10.1007/bf02144998>.
- [7] López-Flores I, Garrido-Ramos MA (2012) The repetitive DNA content of eukaryotic genomes. *Genome Dyn* 7:1–28
- I. López-Flores, M.A. Garrido-Ramos, The repetitive DNA content of eukaryotic genomes, *Genome Dyn.*, 7, lipanj 2012, 1-28, <https://doi.org/10.1159/000337118>.
- [8] J.J. Yunis, W.G. Yasmin, Heterochromatin, satellite DNA, and cell function. Structural DNA of eucaryotes may support and protect genes and aid in speciation, *Science*, 174(4015), prosinac 1971, 1200–1209. <https://doi.org/10.1126/science.174.4015.1200>.
- [9] S. Ohno, So much "junk" DNA in our genome, *Brookhaven Symp. Biol.* 23, siječanj 1972, 366–370, PMID: 5065367.
- [10] L.E. Orgel, F.H. Crick, Selfish DNA: the ultimate parasite, *Nature*, 284, travanj 1980, 604–607, <https://doi.org/10.1038/284604a0>.
- [11] F.J. Sedlazeck, H. Lee, C.A. Darby, M.C. Schatz, Piercing the dark matter: bioinformatics of

- long-range sequencing and mapping, *Nature Rev. Genet.*, 19, lipanj 2018, 329–346, <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0003-4>.
- [12] M. Plohl, Those mysterious sequences of satellite DNAs, *Periodicum Biologorum*, 112(4), prosinac 2010, 403–410, <https://hrcak.srce.hr/63710>.
- [13] M.A. Biscotti, E. Olmo, J.S. Heslop-Harrison, Repetitive DNA in eukaryotic genomes, *Chromosome Res.*, 23(3), rujan 2015, 415–420, <https://doi.org/10.1007/s10577-015-9499-z>.
- [14] E. Šatović-Vukšić, M. Plohl, Exploring Satellite DNAs: Specificities of Bivalve Mollusks Genomes, *Prog. Mol. Subcell. Biol.* 60, 2021, 57–83, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74889-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74889-0_3).
- [15] E. Šatović-Vukšić, M. Plohl, Satellite DNAs-From Localized to Highly Dispersed Genome Components, *Genes (Basel)*, 14(3), ožujak 2023, 742. <https://doi.org/10.3390/genes14030742>.
- [16] K.K. Kojima, Structural and sequence diversity of eukaryotic transposable elements, *Genes Genet. Syst.*, 94(6), siječanj 2019, 233–252, <https://doi.org/10.1266/ggs.18-00024>.
- [17] E.S. Lander, L.M. Linton, B. Birren, C. Nusbaum, M.C. Zody i sur., Initial sequencing and analysis of the human genome, *Nature*, 409(6822), veljača 2001, 860–921, doi: 10.1038/35057062.
- [18] Cremer T, Cremer C. Chromosome territories, nuclear architecture and gene regulation in mammalian cells. *Nature Rev Genet.* 2001 Apr;2(4):292–301. <https://doi.org/10.1038/35066075>.
- [19] P. Novák, P. Neumann, J. Macas, Global analysis of repetitive DNA from unassembled sequence reads using RepeatExplorer2, *Nature Protocols*, 15(11), studeni 2020, 3745–3776. <https://doi.org/10.1038/s41596-020-0400-y>.
- [20] E. Šatović, M. Tunjić-Cvitanić, M. Plohl, Tools and databases for solving problems in detection and identification of repetitive DNA sequences, *Period. Biol.*, 121–122, prosinac 2020, 7–14, <https://doi.org/10.18054/pb.v121-122i1-2.10571>.
- [21] D. Khost, D. Eickbush, A. Larracuenta, Single molecule long read sequencing resolves the detailed structure of complex satellite DNA loci in *Drosophila melanogaster*, *Genome Res*, 27(5), svibanj 2017, 709–721, <https://doi.org/10.1101/gr.213512.116.Freely>.
- [22] S. Aganezov, S.M. Yan, D.C. Soto, M. Kirsche, S. Zarate i sur., A complete reference genome improves analysis of human genetic variation, *Science*, 376(6588), travanj 2022, eabl3533, <https://doi.org/10.1126/science>.
- [23] Y.B. Kim, J.H. Oh, L.J. McIver, E. Rashkovetsky, K. Michalak i sur., Divergence of *Drosophila melanogaster* repeatomes in response to a sharp microclimate contrast in Evolution Canyon, Israel, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111(29), srpanj 2014, 10630–10635, <https://doi.org/10.1073/pnas.1410372111>.
- [24] L.N. Porokhovnik, N.N. Veiko, E.S. Ershova, S.V. Kostyuk, The role of human satellite III (1q12) copy number variation in the adaptive response during aging, stress, and pathology: A pendulum model, *Genes (Basel)*, 12(10), rujan 2021, 1524, <https://doi.org/10.3390/genes12101524>.
- [25] S. Henikoff, K. Ahmad, H.S. Malik, The centromere paradox: stable inheritance with rapidly evolving DNA, *Science* 293(5532), kolovoz 2001, 1098–1102, <https://doi.org/10.1126/science.1062939>.
- [26] S. Louzada, M. Lopes, D. Ferreira, F. Adegá, A. Escudeiro, M. Gama-Carvalho, R. Chaves, Decoding the role of satellite DNA in genome architecture and plasticity—an evolutionary and clinical affair, *Genes*, 11(1), siječanj 2020, 72, <https://doi.org/10.3390/genes11010072>.
- [27] J.M. Sadino, Z.R. Donaldson, Prairie voles as a model for understanding the genetic and epigenetic regulation of attachment behaviors, *ACS Chem Neurosci.*, 9(8), kolovoz 2018, 1939–1950, <https://doi.org/10.1021/acscchemneuro.7b00475>.

## BRIEF OVERVIEW OF GENOME RESEARCH IN THE LIGHT OF GENERAL SYSTEMS THEORY

**Abstract:** According to the General Systems Theory, the world is structured as a series of interacting systems that are subject to the same laws, and altogether form a whole. In biology, all questions about structures, processes and the organization that makes them functional need to be answered at all levels. Studying the laws of inheritance, genes and the deoxyribonucleic acid (DNA) molecule has shown that multicellular organisms possess a surplus of DNA beyond what is needed for the genes themselves. For a long time, this

"excess" DNA was considered a useless burden, and it has been shown to also pose a significant obstacle to the full completion of genome projects. Thanks to the advancement of technology and bioinformatics, this paradigm has been changed. Today's research, in accordance with the idea that the hereditary information in the genome should represent a complete system, has shown numerous roles of this additional DNA, primarily in defining genomic architecture, function and evolution.

*Miroslav Plohl*



## ON THE NATURE OF POTENTIALS AND GAUGE TRANSFORMATIONS IN CLASSICAL ELECTROMAGNETICS

Dragan Poljak, University of Split, FESB

*The vector potential is the mathematical quantity which can be considered as the fundamental quantity of the electromagnetic theory.*

*James Clerk Maxwell*

### Abstract:

The paper deals with a meaning of the potentials and gauge transformations in classical electromagnetics. In majority of electromagnetic course textbooks Maxwell equations are postulated from the empirical basis featuring the use of electric and magnetic fields as quantities of interest. On the other hand electromagnetic potentials are treated as auxiliary mathematical functions being neither unique nor measurable, thus not having any physical meaning. The problem of uniqueness is handled by gauge transformations. Also, the choice of different gauge conditions is often considered to be governed by pure mathematical conveniences not affecting the electric and magnetic fields. These fields are then regarded as gauge invariant. On the other hand, in modern physics the principle of gauge invariance is considered to be the keystone for any physical field. From this view the gauge conditions could be regarded as continuity equations in electromagnetics. This obvious ambiguity and dichotomy have become a rather hot topic in both history and philosophy of physics.

**Keywords:** Classical electromagnetics, potentials and fields, gauge conditions, physical meaning, continuity equation

### **Introduction**

In classical electromagnetics the potentials, magnetic vector potential and electric scalar potential are not regarded as unique quantities and, therefore, are not measurable physical quantities. Consequently, they are viewed as merely mathematical constructs and do not represent physically existing fields [1-4]. On the other hand, the electric field and magnetic field can be readily defined in terms of potentials  $A$  and  $\phi$  as they are invariant under certain gauge transformations [5]. Therefore, contrary to the potentials, the fields are uniformly determined.

Invariance, or symmetry, represents a change in system which does not affect the action integral, or the equation of motions [6] while gauge principle is considered to be a central concept in theoretical fundamentals of modern physics [1].

Thus, majority of textbooks on classical electromagnetics start from Maxwell's equations treating them as mathematical representations of experimentally discovered natural laws.

In particular, the continuity equation is then considered to be a consequence of Maxwell's equations that can be derived in a straightforward manner by using vector calculus,

e.g. [7-8]. Within this approach electric and magnetic fields are gauge invariant, while potentials are just auxiliary functions, i.e. pure mathematical constructs without proper physical meaning.

Therefore, from the view of classical electrodynamics, there is no physical meaning associated with potentials, also referred to as *gauge fields* [1].

Yet, the absence of physical meaning of the vector potential is far from being written in the stone and an opposite approach is mathematically also possible and could be found elsewhere, e.g. in [5], [9], [10-12]. In latter approach one exploits symmetry properties of the Lagrangian, and thus easily introducing electromagnetic potentials (which in this case can be regarded as more fundamental entities than in the case in which one considers corresponding equation of motions instead of Lagrangian). Using such an approach it is possible to derive continuity equation, Lorenz force, and Maxwell's equations from a proper Lagrangian [5].

It is important to emphasize that vector potential in contemporary physics vector potential is rather important quantity [4]. Thus, in quantum physics  $A$  represents a fundamental quantity in the Schrodinger equation for a charged particle and in interactions occurring in quantum electrodynamics (QED). Also, some authors addressed certain experiments demonstrating the reality and importance of potentials in quantum physics [4].

In addition, within the framework of theory of relativity featuring covariant formulation magnetic vector potential is composed with scalar potential into the four potential [9].

The problem of physical meaning of scalar potential is appreciably less pronounced as it can be easily understood as potential energy per unit charge. On the other hand, historically speaking James Clerk Maxwell considered vector potential to be a stored momentum per unit charge and named it *electromagnetic momentum* [13].

Thomson shared a similar attitude and considered vector potential as appropriate field momentum per unit charge [4].

Furthermore, nowadays dominantly present view in classical electromagnetics textbooks came from Heaviside and Hertz who both, independently from each other, rewrote the original 20 scalar Maxwell's equations into modern vector form, and both treated vector potential as nonphysical, artificial quantities convenient only for easier calculations of physically existing electric and magnetic fields [14].

This paper discusses a possible meaning of *magnetic vector potential* and *Lorenz gauge* by which vector potential is mathematically completely determined. First equation of continuity, expressing the conservation of charge, stemming from symmetry of the Lagrangian in classical mechanics is addressed and then Lorenz gauge is discussed. Finally, it is shown that Lorenz gauge can be considered as a continuity equation for potentials and how this gauge is associated with equation of continuity for charge and current density, respectively.

## Equation of continuity and vector potential from gauge invariance

Lagrangian  $L$  in classical mechanics is defined as difference between kinetic energy ( $W_{\text{kin}}$ ) and potential energy ( $W_{\text{pot}}$ ) of the system [6]

For particle of mass  $m$  with displacement  $\vec{r}$  at time  $t$   $L\left(\vec{r}, \frac{d\vec{r}}{dt}, t\right)$  is given by [5]

$$L = \frac{1}{2} m \dot{r}^2 - W_{\text{pot}}(\vec{r}) \quad (1)$$

where  $\left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right| = \dot{r}$  is the particle velocity and  $W_{\text{pot}}(\vec{r})$  stands for potential energy (in the absence of electromagnetic field).

According to the symmetry of the Lagrangian stemming from Noether's theorem [5-6] a total time derivative may be added to Lagrangian (1) without changing the equation of motion [5], i.e. one can define a new Lagrangian  $L'$ , as follows [5]

$$L' = L + q \frac{d\Lambda}{dt} \quad (2)$$

where  $q$  stands for the electric charge and  $q\Lambda(\vec{r}, t)$  is an arbitrary differentiable scalar function.

Therefore, the Lagrangian  $L$  and  $L'$  are equivalent.

For the point particle the charge density  $\rho$  can be written

$$\rho(\vec{R}, t) = q\delta[\vec{R} - \vec{r}(t)] \quad (3)$$

where  $\delta [ ]$  is Dirac delta function.

In the next step, the current density can be expressed as charge in motion, i.e.

$$\vec{J}(\vec{R}, t) = q \frac{d\vec{r}(t)}{dt} \delta[\vec{R} - \vec{r}(t)] \quad (4)$$

Integrating over volume  $V$  yields

$$q = \int_V \rho(\vec{R}, t) dV \quad (5)$$

Performing total differentiation with respect to time

$$L' = L + q \left[ \frac{\partial \Lambda}{\partial n} \frac{dr}{dt} + \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \right] \quad (6)$$

Lagrangian (2) can be written as follows

$$L'_0 = L_0 + \partial_\mu (J^\mu \Lambda) \quad (7)$$

where  $\partial_\mu$  is derivative operator given by

$$\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu}, \quad \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (8)$$

which represents the following operator

$$\partial_\mu \Rightarrow \left( \frac{\partial}{\partial x^0}, \frac{\partial}{\partial x^1}, \frac{\partial}{\partial x^2}, \frac{\partial}{\partial x^3} \right) \quad (9)$$

Note that 0 -komponent pertains to time, while 1, 2 and 3 denote x, y and z component.

Furthermore,  $J^\mu$  stands for current four-vector assigned to the particle, while  $\Lambda$  is an arbitrary function of  $x^\mu$ .

In particular,  $J^\mu$  is the current four-vector and can be written as

$$J^\mu = (\rho, J^x, J^y, J^z) \quad (10)$$

As the zero label pertains to time component, it turns out

$$J^0 = \rho \quad (11)$$

where  $\rho$  is the volume charge density.

Furthermore, equation (7), according to the rule of derivative of product of two functions can be written in the form

$$L'_0 = L_0 + \Lambda \partial_\mu J^\mu + J^\mu \partial_\mu \Lambda \quad (12)$$

Now a new four-vector, i.e. four-potential  $A_\mu$  coupling to  $J^\mu$  can be introduced

$$(A_1, A_2, A_3, A_4) = (\varphi, -A) \quad (13)$$

and the new Lagrangian can be written as follows

$$L_{0i} = L_i - J^\mu A_\mu \quad (14)$$

and one has

$$L'_{0i} = L_0 + \Lambda \partial_\mu J^\mu - J^\mu A'_\mu \quad (15)$$

where

$$A'_\mu = A_\mu - \partial_\mu \Lambda \quad (15)$$

which can be written as following set of equations [5]:

$$\vec{A}' = \vec{A} + \nabla \Lambda(\vec{R}, t) \quad (16)$$

$$\varphi' = \varphi - \frac{\partial \Lambda(\vec{R}, t)}{\partial t} \quad (17)$$

where  $A$  and  $A'$  stand for magnetic vector potential, while  $\varphi$  denotes the electric scalar potential.

Therefore,  $A'$  and  $A$  satisfy all the equations and result in same (physically existing) fields.

It is also important to emphasize that  $A_\mu$  is not determined by any prescribed initial condition. Therefore, a part of  $A_\mu$ , i.e. its one degree of freedom does not have a physical meaning. This spurious degree of freedom can be eliminated by imposing a constraint, or so-called gauge condition, such as the Lorenz gauge to be addressed later in this paper.

Now, Lagrangians (14) and (15) are equivalent if the following condition is satisfied

$$\partial_\mu J^\mu = 0 \quad (18)$$

which can be written in the standard form

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{R}, t) - \frac{\partial \rho(\vec{R}, t)}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

Expression (19) is well-known *equation of continuity* relating charge and current density respectively and it is derived from the gauge invariance of classical mechanics, i.e. from the symmetry property of the Lagrangian. Conservation of electric charge is a consequence of the Lagrangian gauge invariance.

The same result could be obtained from total electromagnetic Lagrangian [9]

$$L_{EM} = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + J_i A_i - \rho\varphi \quad (20)$$

where [9]

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \quad (21)$$

and Faraday tensor is given by

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & -B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

In the standard vector notation the total electromagnetic Lagrangian density can be written as

$$L_d = \frac{1}{2\mu} \cdot (\nabla \times \vec{A})^2 - \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \left( \nabla \varphi + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)^2 + \vec{J} \cdot \vec{A} - \rho \cdot \varphi \quad (23)$$

Lagrangian density (23) can be easily shown to contain four Maxwell equations [7-8].

### **The meaning of magnetic vector potential**

It can be readily shown that magnetic vector potential is to a certain extent associated with total momentum of the charged particle, e.g. [4].

For a charged particle moving along one axis (i) of rectangular coordinate system by a velocity  $v_i$  a Lagrangian can be written in the form

$$L = \frac{1}{2} m v_i^2 - W_{pot} + q v_i A_i - q \varphi \quad (24)$$

where  $W_{pot}$  and  $q\varphi$  stands for different contributions to potential energy.

The canonical momentum  $p_i$  is defined as [4]

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial v_i} \quad (25)$$

and by applying (25) to (24) one has

$$p_i = mv_i + qA_i \quad (26)$$

Expression (26) can be regarded as generalized momentum being conserved under certain conditions. Note that this generalized momentum is now composed from well-established *linear momentum*  $mv_i$  and quantity  $qA_i$  which can be referred to as electromagnetic momentum which is in accordance to the *Maxwell-Thomson* view of magnetic vector potential as the stored momentum per unit charge [4].

### **The meaning of Lorentz gauge**

Expressing the electric and magnetic fields in terms of scalar and vector potential

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (27)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (28)$$

Gauss law for the electric field

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (29)$$

can be now written

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{A}) = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (30)$$

In addition, from the generalized Ampere's law

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (31)$$

one obtains

$$-\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\mu \vec{J} + \mu \varepsilon \left[ \nabla \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \right] \quad (32)$$

Taking into account identity

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (33)$$

it follows

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} + \nabla \left( \nabla \cdot \vec{A} \right) + \mu\epsilon \nabla \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (34)$$

which can also be written as

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} + \nabla \left( \nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (35)$$

Choosing the Lorentz gauge, as follows

$$\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (36)$$

one deals with wave equation for scalar and vector potential, respectively. In covariant formalism (36) can be written as

$$\partial^\mu A_\mu = 0 \quad (37)$$

or

$$\partial_\mu A^\mu = 0 \quad (38)$$

Note that derivative operators are defined as:

$$\partial^\mu = \left( \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right) \quad (39)$$

and

$$\partial_\mu = \left( \frac{\partial}{\partial t}, -\nabla \right) \quad (40)$$

Therefore, Lorentz gauge (36) leads to the set of nonhomogeneous wave equations for scalar and vector potential, respectively:

$$\nabla^2 \varphi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (41)$$

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (42)$$

What is the meaning of Lorentz gauge (36)? To come up with an answer it is helpful to write (36) in the frequency domain

$$\nabla \cdot \vec{A} + j\omega\mu\epsilon \cdot \varphi = 0 \quad (43)$$



Now, assuming that  $J$  and  $\rho$  represent all sources within a volum  $V'$  the solution of (41)-(42) can be expressed by following particular integrals:

$$\vec{A}(r,t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}', t - R/c)}{R} dV' \quad (44)$$

$$\varphi(\vec{r},t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r}', t - R/c)}{R} dV' \quad (45)$$

The variables pertaining to source and observation point, respectively, are shown in Fig 1.

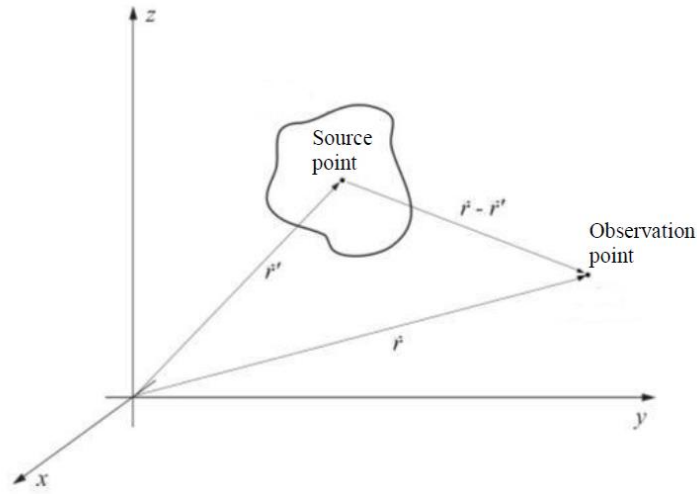


Fig.1. The source point and observation point

For time-harmonic dependence, set of equations (44)-(45) becomes

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r}') e^{-jkR}}{R} dV' \quad (46)$$

$$\vec{A}(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') e^{-jkR}}{R} dV' \quad (47)$$

Now inserting (46)-(47) into (43) yields

$$\frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dV' + \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{V'} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dV' = 0 \quad (48)$$

which can be written as

$$\int_{V'} \left[ \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}') + j\omega\rho(\vec{r}') \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dV' = 0 \quad (49)$$

or, using the Green function notation one has

$$\int_{V'} [\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}') + j\omega\rho(\vec{r}')] G(\vec{r}, \vec{r}') dV' = 0 \quad (50)$$

Now, as  $G(\vec{r}, \vec{r}')$  is always different from zero, one obtains

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}') + j\omega\rho(\vec{r}') = 0 \quad (51)$$

which is a frequency domain counterpart of (19).

Therefore, equation (36), or its frequency domain counterpart (43) essentially represents the continuity equation for potentials. This could be regarded as a 'missing' physical meaning of Lorentz gauge.

## Conclusion

The nature of the potentials and gauge transformations in classical electromagnetics is discussed in this work. Maxwell equations dealing with electric and magnetic fields and their sources are postulated from the empirical basis in most commonly used approach in textbooks on electromagnetics. Within such an approach, the electromagnetic potentials are derived from Maxwell's equations as purely mathematical construct aiming to provide one with more efficient calculation tool for fields. These potentials are not unique nor measurable quantities and, consequently, are not considered to have a physical meaning. The problem of uniqueness is handled by gauge transformations, while different gauge conditions are often considered as pure mathematical conveniences not affecting the electric and magnetic fields. However, in addition to the fact that the principle of gauge invariance is considered to be crucial for the rigorous mathematical description of fields in contemporary physics, it is also shown that Lorenz gauge could be regarded as continuity equation for potential. Finally, physical meaning of magnetic vector potential is associated with electromagnetic momentum, while scalar potential is regarded as energy per unit charge.

## References:

- [1] G.Rousseaux, R.Kofman, O. Minazzoli, The Maxwell-Lodge Effect: Significance of Electromagnetic Potentials in the Classical theory, Eur. Phys. J. D, 49, pp. 249-256, 2008.
- [2] G. Rousseaux,, On the Physical Meaning of the Gauge Conditions of Classical electromagnetism: The Hydrodynamics Analogue Viepoint,, Anales de la Fondation Louis de Broglie, Fondation Louis de Broglie, 28, No 2, pp. 261-269, 2003.
- [3] N.J. Carron, On the Fields of a Torus and the Role of the Vector Potential, American Journal of Physics 63, 717pp. 717-729, Aug. 1995.
- [4] M. D. Semon, J.R. Taylor, Thoughts on the Magnetic Vector Potential, Am. J. Phys., 64(11), pp. 1361-1369, Nov. 1996.
- [5] D. H. Cobe, Derivation of Maxwell's Equations from the Gauge Invariance of Classical Mechanics, American Journal of Physics 48, 348 (1980), pp. 348-353
- [6] D.E. Neuenschwander, *Emmy Noether's Wonderful Theorem*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 2011.

- [7] D. Poljak, "Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility", Wiley-Interscience, New Jersey, USA, 2007.
- [8] D. Poljak, K. El Khamlichi Drissi, *Computational Methods in Electromagnetic Compatibility; Antenna Theory Approach versus Transmission Line Models*, John Wiley & Sons, New York, 2018.
- [9] L. Suskind and A. Friedman, *Special Relativity and Classical Field Theory*, Penguin, UK, 2017.
- [10] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics Part I: Derivation of Continuity Equation and Lorentz Force. // 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Croatia, Sept. 2022.
- [11] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics: Part II: Derivation of Maxwell's Equations, 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) Split, Croatia, Sept. 2022.
- [12] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics: Part III: Applications, 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) Split, Croatia, 2022.
- [13] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Phil. Trans.*, 166, 1865, pp. 459-512.
- [14] J. W. Arthur, "The Evolution of Maxwell's Equations from 1862 to the Present Day," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55, 3, 2013, pp. 61 – 81.

## O PRIRODI POTENCIJALA I BAŽDARNIH TRANSFORMACIJA U KLASIČNOM ELEKTROMAGNETIZMU

Dragan Poljak, Sveučilište u Splitu, FESB

### Sažetak:

U radu se razmatra značenje potencijala i baždarnih transformacija u klasičnom elektromagnetizmu. U većini udžbenika elektromagnetizma Maxwellove jednadžbe se postuliraju na empirijskoj osnovi uz korištenje električnih i magnetskih polja kao veličina od interesa. S druge strane, elektromagnetski potencijali se tretiraju kao pomoćne matematičke funkcije koje nisu ni jednoznačne ni mjerljive, stoga nemaju nikakvo fizikalno značenje. Problem jednoznačnosti rješava se primjenom baždarnih transformacija. Također, izbor različitih baždarnih uvjeta obično se smatra motiviran čistim matematičkim pogodnostima koje ne utječu na električna i magnetska polja. Ova polja se onda nazivaju baždarno invarijantnim. S druge strane, u modernoj fizici princip baždarne invarijantnosti se smatra temeljnim za bilo koje fizikalno polje. Iz ove perspektive baždarni uvjeti mogu se smatrati jednadžbama kontinuiteta u elektromagnetizmu. Ova očita dvosmislenost i dihotomija postaju prilično goruća tema u kako u povijesti, tako i u filozofiji fizike.

**Ključne riječi:** Klasični elektromagnetizam, potencijali i polja, baždarni uvjeti, fizikalno značenje, jednadžbe kontinuiteta



*Ivan Flegar*

[ii.flegar@gmail.com](mailto:ii.flegar@gmail.com)

## FIZIKALNE OSNOVE RADA TRANSFORMATORA

**Sažetak:** U elektrotehničkoj literaturi rad transformatora objašnjava se koristeći kauzalnu interpretaciju Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije, dok se osnovna zadaća transformatora – prijenos energije između galvanski odvojenih izmjeničnih mreža – ili uopće ne objašnjava ili se objašnjava u terminima teorije električkih mreža. Iako vodi do ispravnih zaključaka, kauzalna interpretacija Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije nije u skladu s općeprihvaćenim shvaćanjem pojma elektromagnetskog polja u fizici. Teorija električkih mreža može jedino opisati naponsko-strujne odnose na prilazima transformatora, dok je ono što se događa unutar transformatora, kao što je to prijenos energije između namota, nedostupno teoriji električkih mreža. Na primjeru dvonamotnog transformatora s feromagnetskom jezgrom pokazano je u članku kako se u okviru teorije elektromagnetskog polja može korektno objasniti rad transformatora koristeći nekauzalnu interpretaciju Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije i Poyntingov teorem.

**Ključne riječi:** električno polje, kauzalnost, magnetsko polje, prijenos energije, Poyntingov vektor

### Uvod

Transformatori su elektrotehnički uređaji koji se industrijski proizvode od 1880. godine i o kojima je do danas skupljeno ogromno inženjersko iskustvo u projektiranju, proizvodnji i eksploataciji. Razvoj transformatora pratila je od

samih početaka i odgovarajuća stručna literatura – monografije, udžbenici i stručni članci – koja je pomogla generacijama inženjera da uz vlastito praktično iskustvo postanu kompetentni projektanti ili korisnici transformatora. Spomenimo samo neke od monografija koje su obilježile razvoj transformatora: monografije austrijsko–britanskog inženjera i profesora Gisberta Kappa [1], slovenskog inženjera, profesora i šahovskog velemajestora Milana Vidmara [2], grupe eksperata iz tvrtke General Electric Company [3], grupe eksperata sa sveučilišta Massachusetts Institute of Technology [4], kao i monografiju “J & P Transformer Book” [5], čije je prvo izdanje izašlo još 1925. godine. Monografija je mijenjajući autore višekratno novelirana, te je 2016. godine izašlo za sada posljednje 14. izdanje. Na našem jezičnom području ističe se udžbenik profesora Antona Dolenca [6] kao i opsežan članak profesora Tomislava Kelemena objavljen u Tehničkoj enciklopediji [7].

U monografijama, stručnim člancima pa čak i u udžbenicima o transformatorima fizikalnim osnovama rada transformatora obično se ne posvećuje posebna pozornost; smatraju se jednostavnim i utemeljenim na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. No, znatizeljan, ali kritički nastrojen čitatelj, proučavajući u spomenutoj literaturi uvodna poglavlja o fizikalnim osnovama rada transformatora, suočit će se sa dva problema koji mu mogu zamagliti fizikalno razumijevanje rada transformatora.

Prvi se problem odnosi na tvrdnju, koja se može pronaći u praktički svoj stručnoj i znanstvenoj literaturi, da vremenski promjenljivo magnetsko polje uzrokuje pojavu vremenski promjenljivog električnog polja. Time se Faradayevom zakonu (elektromagnetske indukcije) pripisuje kauzalnost, odnosno ideja koja je s odbacivanjem etera kao fizičkog entiteta odbačena iz fizike još početkom 20. stoljeća. Zbog toga se uzajamni utjecaj između namota pogrešno pripisuje magnetskom polju, a ne istodobno s magnetskim poljem stvorenom vrtložnom električnom polju. Dobiveni rezultat – transformatorske jednadžbe – u oba je slučaja isti, ali je objašnjenje rada transformatora utemeljeno na pojmu vrtložnog električnog polja u skladu s općeprihvaćenim shvaćanjem pojma elektromagnetskog polja u klasičnoj elektrodinamici. Prema literaturi koja je poznata autoru taj je pristup objašnjenju rada transformatora dan samo u monografiji američkog fizičara Gerainta Rossera [8] te djelomično u udžbeniku srpskog profesora i inženjera Branka Popovića [9].

Drugi se problem odnosi na činjenicu da se u stručnoj literaturi o transformatorima kao i u udžbenicima iz osnova elektrotehnike ne objašnjava eksplicitno prijenos energije između galvanski odvojenih izmjeničnih krugova, iako je to osnovna zadaća transformatora. Proizlazi da se prijenos energije transformatorom u stručnoj literaturi smatra samorazumljivim pojmom čije se značenje može logički deducirati iz objašnjenja rada transformatora

Najbolji dokaz da prijenos energije transformatorom nije samorazumljiv pojam jest činjenica da su prvo korektno fizikalno objašnjenje prijenosa energije

transformatorom i to u okviru teorije elektromagnetskog polja dali tek 1967. godine američki fizičari Fred Beck i Asher Pacholder [10], dakle, osamdesetak godina nakon početka industrijske proizvodnje transformatora. Oni su pokazali da je nužan uvjet prijenosa energije transformatorom postojanje rasipnog magnetskog polja u transformatoru. Taj je zaključak izrazito protuintuitivan jer pokazuje da je ono što se smatra parazitnim svojstvom transformatora – postojanje rasipnog magnetskog polja – bitno za njegov rad. U elektrotehničkoj praksi taj rad kao i kasniji radovi drugih fizičara nisu imali odjeka [11 – 14]. Primjerice, u modernoj stručnoj literaturi o transformatorima nema ni spomena o fizikalnom objašnjenju prijenosa energije [15, 16]. Najvjerojatniji bi razlog mogao biti taj što većina potencijalno zainteresiranih inženjera – projektanata nije za te radove fizičara ni znala. I što je još važnije, oni inženjeri koji su za te radove znali i razumjeli ih mogli su ispravno zaključiti da rezultati tih radova nemaju praktičnih posljedica na uspješnije projektiranje transformatora.

U članku su na najjednostavnijem primjeru dvonamotnog transformatora s linearnom karakteristikom magnetiziranja feromagnetske jezgre, koristeći nekauzalnu interpretaciju Faradayeva zakona, izvedene općepoznate transformatorske jednadžbe. Također, pokazano je da se prijenos energije transformatorom može korektno objasniti jedino u okviru teorije elektromagnetskog polja koristeći Poyntingov teorem, odakle proizlazi da se rad transformatora ne zasniva samo na Faradayevom zakonu, kako se to često tvrdi, nego i na Ampèreovom zakonu struje.

## **1. Interpretacija Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije i Ampèreova zakona struje**

### **1.1. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije**

Uobičajeno objašnjenje rada transformatora najčešće započinje tvrdnjom da se rad transformatora zasniva na Faradayevom zakonu (elektromagnetske indukcije). U sažetoj formi možda je to najbolje opisano u prvom pasusu odsječka 1.2 “Idealni transformator – prijenosni omjer napona” iz monografije “The J. and P. Transformer Book” [5, str. 2]. U tom pasusu piše:

“Kada se na jedan od namota, općenito po definiciji primarni namot, narine izmjenični napon poteći će struja koja stvara izmjeničnu magnetomotornu silu i time izmjenični tok u jezgri. Taj izmjenični (magnetski) tok povezujući oba namota inducira u svakome od njih elektromotornu silu<sup>1</sup>.”

---

<sup>1</sup> Druga rečenica citata u originalu glasi: „This alternating flux in linking both windings induces an e.m.f. in each of them.“

Drugom je rečenicom interpretiran Faradayev zakon na način uobičajen u svoj stručnoj literaturi i većini udžbenika iz fizike. Za razumijevanje Faradayeva zakona, a time posljedično i načina rada transformatora, ključno je znati pravo značenje glagola 'inducirati'. Na našem jezičnom području taj glagol u elektrotehničkom i fizikalnom kontekstu opisa pojave elektromagnetske indukcije znači 'izazvati (izazivati)', tj. učiniti da se što pojavi ili dogodi. Na engleskom jezičnom području, odakle je taj glagol (*to induce*) došao u naš stručni jezik elektrotehnike, u tom istom kontekstu, znači 'uzrokovati da se što dogodi'. Proizlazi da su u stručnom jeziku glagoli 'inducirati', 'izazvati (izazivati)' i 'uzrokovati (prouzročiti)' sinonimi. Druga rečenica citata bi tada bila jasnija i glasila bi: "Taj izmjenični magnetski tok povezujući oba namota uzrokuje u svakome od njih pojavu elektromotorne sile." Time bi se nedvosmisleno istaknula uzročno-posljedična veza, tj. kauzalnost, između magnetskog toka kao uzroka i elektromotorne sile kao posljedice (učinka). Drugim riječima, izrijeком bi se tvrdilo da je Faradayev zakon kauzalan zakon. U okviru teorije elektromagnetskog polja to bi značilo da vremenski promjenljivo magnetsko polje uzrokuje pojavu vremenski promjenljivog električnog polja.

No, je li Faradayev zakon kauzalan zakon? U pokušaju odgovora na to pitanje treba se prisjetiti da Faradayev zakon primijenjen na analizu rada transformatora određuje kvantitativno što se događa u krugu prožetom vremenski promjenljivim magnetskim poljem koji miruje u odnosu na referentni sustav promatrača. U diferencijalnom obliku Faradayev zakon dan je izrazom

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1a)$$

gdje su  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{B}$  vektori koji karakteriziraju električno odnosno magnetsko polje i smatraju se temeljnim vektorima za opis elektromagnetskog polja. Vektor  $\mathbf{E}$  predstavlja jakost električnog polja, dok vektor  $\mathbf{B}$  predstavlja magnetsku indukciju odnosno jakost magnetskog toka po jedinici površine<sup>2</sup>. Budući da rotor vektora  $\mathbf{E}$  nije identički jednak nuli, električno je polje vrtložno (solenoidalno) odnosno nekonzervativno polje. U integralnom obliku Faradayev zakon dan je izrazom

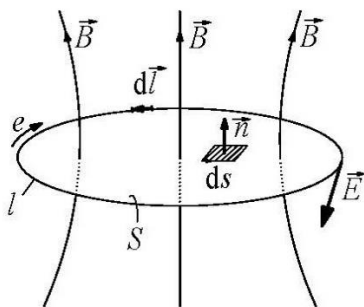
$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} ds \quad (1b)$$

---

<sup>2</sup> Logički i terminološki bilo bi dosljedno da se vektor  $\mathbf{B}$  naziva 'jakost magnetskog polja' ili kraće samo 'magnetsko polje', s istim razlozima zbog kojih se vektor  $\mathbf{E}$  naziva 'jakost električnog polja' odnosno najčešće samo 'električno polje'. No, taj je naziv već prije bio usvojen za vektor magnetskog polja  $\mathbf{H}$ , za koji bi primjereniji naziv bio 'jakost magnetizirajućeg polja' ili kraće samo 'magnetizirajuće polje'.

gdje je  $d\vec{l}$  diferencijal zatvorenog puta  $l$  duž kojeg se integrira vektor jakosti električnog polja  $\vec{E}$ ,  $\vec{n}$  je jedinični vektor okomit na diferencijal  $ds$  plohe  $S$ , omeđene zatvorenim putem  $l$ , po kojoj se integrira vektor magnetske indukcije  $\vec{B}$ , slika 1. Integralom na lijevoj strani jednadžbe (1b) definirana je elektromotorna sila<sup>3</sup>  $e$  koja djeluje duž zatvorenog puta (petlje)  $l$ , dok je integralom na desnoj strani jednadžbe (1b) definiran magnetski tok  $\phi$  obuhvaćen zatvorenim putem (petljom)  $l$  te se Faradayev zakon često piše u obliku

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$



Slika 1. Smjer elektromotorne sile  $e$  ako je  $d\vec{B}/dt > 0$ .

Da bi neki fizikalni zakon bio kauzalan mora postojati matematički izraz – jednadžba ili sustav jednadžbi – koji nedvosmisleno određuje vrijednosti jedne ili više fizikalnih veličina u sadašnjosti – posljedice – s pomoću vrijednosti jedne ili više fizikalnih veličina u prošlosti – uzroka. Posljedica ne može prethoditi uzroku niti se dogoditi istodobno s njim. Zbog toga fizikalni zakoni u kojima se pojavljuju samo vremenski istodobne fizikalne veličine, bilo da su pojave opisane tim zakonima prostorno odvojene ili se odnose na isto mjesto u prostoru, nisu kauzalni zakoni. Kauzalne veze između fizikalnih veličina daju samo jednadžbe koje uzimaju u obzir vremensko kašnjenje posljedice u odnosu na uzrok.

U izrazima (1) ne pojavljuje se vremensko kašnjenje. Vektori električnog i magnetskog polja  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  vremenski su istodobne fizikalne veličine i odnose se na isto mjesto u prostoru, što je eksplicitno iskazano u diferencijalnom obliku

<sup>3</sup> Naziv 'elektromotorna sila', skraćeno 'EMS', neispravno je usmjeren naziv, no zadržan je zbog svoje proširenosti u fizici i elektrotehnici. Naime, elektromotorna sila nije sila nego je, prema izrazu (1b), integral sile  $\vec{F} = q_{jed} \cdot \vec{E}$  koja djeluje na jedinični naboj  $q_{jed} = 1$  As duž zatvorenog puta  $l$ . Drugim riječima, elektromotorna sila je jednaka radu koji bi izvršio jedinični naboj pri jednom obilasku zatvorenog puta (petlje)  $l$ . Taj zatvoreni put može u cijelosti, djelomice ili uopće ne biti dijelom nekog električnog kruga.



Faradayeva zakona, izraz (1a). Proizlazi da je Faradayevim zakonom dana samo korelacija između fizikalnih veličina električnog i magnetskog polja, a ne i uzročno-posljedična veza.

Razlog za savršenu korelaciju, tj. za istodobnu pojavu vrtložnog električnog polja i vremenski promjenljivog magnetskog polja, danu izrazima (1), jest činjenica da su te dvije pojave posljedica zajedničkog uzroka; vremenske promjene gustoće struje. To je prvi dokazao ukrajinsko-američki fizičar Oleg Jefimenko koristeći se pojmom retardiranih potencijala i objavio u svom udžbeniku o elektricitetu i magnetizmu 1966. godine [17]. Jefimenko je poopćujući izraze za elektrostatičke potencijale (skalarni električni i vektorski magnetski potencijal) te pretpostavljajući da se učinci potencijala šire konačnom brzinom (u vakuumu brzinom svjetlosti) izveo dvije međusobno nezavisne kauzalne jednadžbe; jednu za određivanje vektora jakosti električnog polja  $\mathbf{E}$  i drugu za određivanja vektora magnetske indukcije  $\mathbf{B}$ . Te se jednadžbe danas nazivaju Jefimenkove jednadžbe.

Prema Jefimenku, odnosno danas općeprihvaćenoj interpretaciji u fizici, električno i magnetsko polje komponente su jedinstvenog elektromagnetskog polja, vrijednosti kojih ovise o referentnom sustavu promatrača. Električno i magnetsko polje djeluju jedino na električno nabijene čestice elektromagnetskom silom i ne mogu djelovati jedno na drugo.

U skladu s rečenim proizlazi da bi uvodno naveden citat iz monografije [5] trebao glasiti: "Kada se na jedan od namota, općenito po definiciji primarni namot, narine izmjenični napon poteći će struja koja uzrokuje pojavu vrtložnog električnog polja u namotu i prostoru oko primarnog i sekundarnog namota, a time i pojavu elektromotornih sila u oba namota." Činjenica da je prema Faradayevom zakonu elektromotorna sila u nekom namotu numerički jednaka negativnoj brzini promjene magnetskog toka koji prožima taj namot važna je projektantska činjenica, ali nevažna za fizikalno razumijevanje pojave elektromotorne sile u namotu.

Kauzalna interpretacija Faradayeva zakona toliko je proširena da je našla svoje mjesto i u jednom od temeljnih pojmova elektrotehnike. Tako se za dva namota u elektromagnetskom polju kaže da su (među)induktivno vezana ili češće magnetski vezana (spregnuta) i iskazuje tzv. faktorom magnetske veze  $N$ , uzajamni utjecaj između namota postoji zbog električnog polja stvorenog protjecanjem vremenski promjenljive struje kroz jedan ili oba namota, [9]. Zbog toga je naziv 'faktor magnetske veze' pogrešan. No, taj je naziv toliko proširen i posve uobičajen u praksi da ga nema smisla mijenjati, pa će se koristiti i u ovom članku.

Kauzalna interpretacija zakona elektromagnetske indukcije često se u stručnoj i znanstvenoj literaturi pripisuje Faradayu, a katkad i Maxwellu. Jefimenko u svom članku [18] tvrdi da nije uspio pronaći tko je prvi sugerirao da

magnetsko polje uzrokuje električno polje i obratno. Sa sigurnošću je jedino ustanovio da ta ideja nije potekla niti od Faradaya niti od Maxwella.

## 1.2. Ampérov zakon struje<sup>4</sup>

U diferencijalnom obliku Ampérov zakon struje dan je izrazom

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{sl}} \quad (3a)$$

gdje je  $\mathbf{H}$  vektor jakosti magnetskog polja, a  $\mathbf{J}_{\text{sl}}$  vektor gustoće slobodne struje<sup>5</sup>. Budući da rotor vektora  $\mathbf{H}$  nije identički jednak nuli, magnetsko polje  $\mathbf{H}$  je vrtložno (solenoidalno) odnosno nekonzervativno polje. U integralnom obliku Ampérov zakon (struje) dan je izrazom

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J}_{\text{sl}} \cdot \mathbf{n} ds \quad (3b)$$

gdje je  $d\mathbf{l}$  diferencijal zatvorenog puta  $l$  duž kojeg se integrira vektor jakosti magnetskog polja  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{n}$  je jedinični vektor okomit na diferencijal  $ds$  plohe  $S$ , omeđene zatvorenim putem  $l$ , po kojoj se integrira vektor gustoće slobodne struje  $\mathbf{J}_{\text{sl}}$ . U transformatoru, električne struje teku vodičima te se Ampérov zakon svodi na oblik

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_k i_k$$

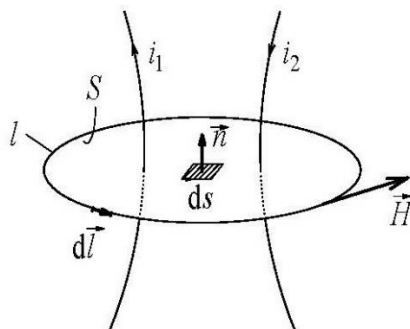
gdje je  $i_k$  struja  $k$ -tog vodiča koji prolazi kroz površinu  $S$  omeđenu zatvorenim putem  $l$ , kako je to prikazano na slici 2. Linijski integral na lijevoj strani jednadžbe uobičajeno se naziva 'magnetomotorna sila'. Pozitivni predznaci struja i smjera integriranja duž puta  $l$  dogovorno su određeni pravilom desnog vijka. Tako u primjeru danom na slici 2 vrijedi da je

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_1 - i_2$$

---

<sup>4</sup> Ampérov zakon struje proizlazi iz Maxwell–Ampérovega zakona zanemarenjem pomaćnih struja. U literaturi se često, pogotovo na njemačkom jezičnom području, Ampérov zakon struje naziva 'zakon protjecanja'.

<sup>5</sup> Slobodne odnosno makroskopske struje su struje uzrokovane gibanjem naboja duž makroskopskih putanja, za razliku od vezanih odnosno Ampérovih struja, koje potječu od molekulskih i atomskih magnetskih momenata uključujući i vlastiti magnetski moment čestica sa spinom [19].



Slika 2: Ilustracija Ampérovega zakona struje

Za razliku od Faradayeva zakona koji povezuje varijable električnog i magnetskog polja i ne daje njihovu vezu s izvorima elektromagnetskog polja, Ampérov zakon povezuje varijable magnetskog polja s jednim od izvora elektromagnetskog polja – električnim strujama. No, Ampérov zakon nije kauzalan zakon, pri čemu je argumentacija za tu tvrdnju analogna onoj kojom je pokazano da ni Faradayev zakon nije kauzalan zakon. Naime, vektori jakosti magnetskog polja  $\vec{H}$  i gustoće slobodne struje  $\vec{J}_s$  vremenski su istodobne fizikalne veličine i odnose se na isto mjesto u prostoru, što je eksplicitno iskazano u diferencijalnom obliku Ampérovega zakona, izraz (3a). To, naravno, ne znači da električne struje nisu izvor (uzrok pojave) elektromagnetskog polja, nego samo to da se kauzalna veza između varijabli magnetskog polja i električnih struja ne može izvesti iz Ampérovega zakona.

## 2. Analiza rada transformatora

Analiza rada transformatora provedena je na primjeru dvonamotnog transformatora s feromagnetskom jezgrom spojenog na javnu izmjeničnu mrežu opterećenog radnim trošilom. Odabran je najjednostavniji mogući (matematički) model transformatora i javne mreže.

### 2.1. Pretpostavke

a) U elektromagnetskom polju transformatora događa se samo uskladištenje i prijenos energije, ne i njezina transformacija u toplinsku energiju. Na razini modela to znači da su zanemarene otpornosti primarnog i sekundarnog namota kao i ekvivalentne otpornosti kojima se predočavaju gubici snage zbog histereze i vrtložnih struja u jezgri transformatora.

b) Relativna permeabilnost feromagnetske jezgre je visoka ( $\mu_r \gg 1$ ) i konstantne je vrijednosti te je karakteristika magnetiziranja transformatora linearna. Zbog toga će za magnetski tok  $\phi_j$  ulančen sa  $N_j$  zavoja  $j$ -tog namota i stvoren vlastitom strujom  $i_j$  vrijediti da je  $N_j \phi_j = L_j i_j$ , ( $j = 1, 2$ ), gdje je konstantom  $L_j$  označena (samo)induktivnost  $j$ -tog namota. Za magnetski tok  $\phi_{jk}$  ulančen sa  $N_j$  zavoja  $j$ -tog namota i stvoren strujom  $k$ -tog namota vrijedi da je  $N_j \phi_{jk} = M_{jk} i_k$ , ( $j = 1, 2; k = 1, 2; j \neq k$ ), gdje je konstantom  $M_{jk} = M_{kj} = M$  označena međuinuktivnost između  $j$ -tog i  $k$ -tog namota.

c) Transformator je priključen na javnu izmjeničnu mrežu frekvencije 50 Hz ili 60 Hz i promatra se u ustaljenom stanju – periodičkom režimu rada. Zbog toga se ponaša kao električki malena mreža, tj. kao kvazistatički sustav [20]. Pomaćne struje se mogu zanemariti, a električno polje površinskih i međuspojnih naboja, koje omogućuje da u svakom trenutku u svim dijelovima nekog serijskog električkog kruga struja ima istu vrijednost, može se s dovoljnom točnošću smatrati konzervativnim poljem [8]. Proizlazi da je elektromotorna sila, koja djeluje duž bilo kojeg zatvorenog puta (petlje)  $l$  u transformatoru i okolnom prostoru zbog električnog polja površinskih i međuspojnih naboja jakosti  $E_{pn}$ , uvijek jednaka nuli, tj. da je

$$\oint_l E_{pn} \cdot dl = 0$$

d) Magnetsko polje transformatora ograničeno je na prostor unutar transformatora i njegovu neposrednu okolinu. Primarni namoti kao i sekundarni namoti transformatora najčešće su cilindričnog oblika, imaju veći broj zavoja te je ta pretpostavka u praksi zadovoljena, pogotovo ako se radi o transformatorima s feromagnetskom jezgrom. Ulazni i izlazni priključci transformatora dovoljno su daleko od transformatora, tako da napone priključaka određuje samo električno polje površinskih (i međuspojnih) naboja.

e) Javna izmjenična mreža modelirana je idealnim izvorom elektromotorne sile  $e_i$ , kako je to prikazano na slici 3. Zbog toga, ukupno električno polje unutar izvora mora biti jednako nuli. U protivnom bi zbog idealnosti izvora struja izvora bila beskonačna. To znači da, uz električno polje  $E_i$  odgovorno za postojanje elektromotorne sile  $e_i$ , u izvoru postoji i električno polje površinskih naboja  $E_{pn}$ , tako da na putu kroz izvor od priključka (1') do priključka (1) vrijedi da je

$$\int_{(1')}^{(1)} E_i \cdot dl + \int_{(1')}^{(1)} E_{pn} \cdot dl = 0 \quad (4)$$

Pretpostavi li se da je električno polje  $E_i$  izvan izvora jednako nuli, elektromotorna sila izvora  $e_i$ , određena duž zatvorenog puta koji uz izvor obuhvaća i primarni namot transformatora, jednaka je

$$e_i = \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = \int_{(1')}^{(1)} \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} \quad (5)$$

Uvrsti li se izraz (5) u jednadžbu (4), dobiva se da je

$$e_i = - \int_{(1')}^{(1)} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l} = \int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}$$

Raspodjela površinskih naboja koja je prouzročila električno polje  $\mathbf{E}_{pn}$  iznosa ( $-\mathbf{E}_i$ ) unutar izvora, prouzročila je i električno polje  $\mathbf{E}_{pn}$  izvan izvora u području gdje je električno polje  $\mathbf{E}_i$  jednako nuli, a linijski integral električnog polja  $\mathbf{E}_{pn}$  duž puta koji prolazi prostorom od priključka (1) do priključka (1') mimo izvora jednak je naponu<sup>6</sup> narinutom na primarni namot transformatora

$$u_1 = \int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l} = \int_{(1')}^{(1)} \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = e_i$$

Električno polje  $\mathbf{E}_{pn}$  je konzervativno polje, što znači da se može okarakterizirati skalarnim električnim potencijalom. Zbog toga napon narinut na primarni namot  $u_1$  ne ovisi o izboru puta kroz prostor između priključaka (1) i (1') duž kojeg se integrira vektor jakosti električnog polja  $\mathbf{E}_{pn}$  nego samo o električnim potencijalima priključaka (1) i (1').

## 2.2. Neopterećeni transformator

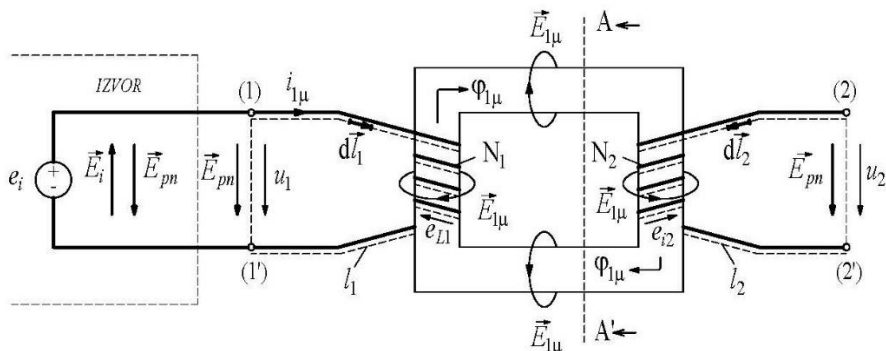
Neka zbog elektromotorne sile izvora  $e_i$  usmjerene od priključka (1') prema priključku (1) primarnim namotom teče struja  $i_1 = i_{1\mu}$  povećavajući se i u smjeru naznačenom na slici 3<sup>7</sup>. Ta vremenski promjenljiva struja  $i_{1\mu}$ , za koju je uobičajen

<sup>6</sup> Električni napon se definira kao integral sile koja djeluje na jedinični naboj duž nekog određenog odsječka zatvorenog puta  $l$ , tj. između dviju točaka na zatvorenom putu  $l$ . No, za jedan odabrani zatvoreni put  $l$  postoje dva različita puta duž kojih se može integrirati sila na jedinični naboj, tako da je, u općem slučaju, pri određivanju (električnog) napona između dviju točaka potrebno specificirati odabrani put integriranja.

<sup>7</sup> U udžbenicima fizike i udžbenicima iz osnova elektrotehnike redovito se načela rada transformatora objašnjavaju na modelu dvonamotnog transformatora gdje je svaki namot smješten na posebnom stupu, kao što je to prikazano na slici. To ne odgovara stvarnim izvedbama dvonamotnih transformatora, ali je metodički opravdano jer omogućuje da se na jednostavan i zoran način prikažu smjerovi namatanja namota, smjerovi narinutih i induciranih napona, putevi integriranja vektora električnog i magnetskog polja kao i smjer toka energije između namota, čime se olakšava razumijevanje izloženog gradiva. Zbog

naziv 'struja magnetiziranja', uzrokuje istodobno pojavu vrtložnog električnog polja jakosti  $\vec{E}_{1\mu}$  oko (feromagnetske) jezgre transformatora i magnetskog polja indukcije  $\vec{B}$  u jezgri transformatora, pri čemu je veza između vektora  $\vec{E}_{1\mu}$  i  $\vec{B}$  dana izrazima (1). Vrtložno električno polje  $\vec{E}_{1\mu}$  prožima primarni namot uzrokujući u njemu protuelektromotornu silu (elektromotornu silu samoindukcije)  $e_{L1}$  kao i sekundarni namot uzrokujući u njemu elektromotornu silu međui indukcije  $e_{i2}$ .

Primijeni li se Faradayev zakon na petlju  $l_1$ , koja jednim dijelom prolazi kroz primarni namot od priključka (1) do priključka (1') a drugim dijelom prolazi kroz prostor od priključka (1') do priključka (1) mimo izvora, dobiva se da je protuelektromotorna sila koja djeluje u petlji  $l_1$  jednaka



Slika 3: Dvonamotni transformator u praznom hodu s naznačenim smjerovima električnih polja i elektromotornih sila

$$e_{L1} = \oint_{l_1} \vec{E}_{1\mu} \cdot d\vec{l}_1 = \int_{(1)}^{(1')} \vec{E}_{1\mu} \cdot d\vec{l}_1 = -L_1' \frac{di_{1\mu}}{dt}$$

gdje je sa  $L_1'$  označena (samo)induktivnost petlje  $l_1$ . Budući da je, prema polaznim pretpostavkama, relativna permeabilnost jezgre visoka, može se s dovoljnom točnošću uzeti da je induktivnost petlje  $l_1$  jednaka induktivnosti primarnog namota  $L_1$ , te je

$$e_{L1} = -L_1 \frac{di_{1\mu}}{dt}$$

Uzimajući u obzir da unutar transformatora postoji vrtložno električno polje  $\vec{E}_{1\mu}$  i električno polje površinskih naboja  $\vec{E}_{pn}$ , a izvan transformatora samo električno polje površinskih naboja  $\vec{E}_{pn}$ , može se izraz za protuelektromotornu silu, zbog konzervativnosti električnog polja  $\vec{E}_{pn}$ , napisati u obliku

---

toga je i u ovom članku odabran taj "školski" primjer izvedbe dvonamotnog transformatora.

$$e_{L1} = \int_{(1)}^{(1')} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_{pn}) \cdot d\mathbf{l}_1 + \int_{(1')}^{(1)} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_1$$

Primarni namot je savršeno vodljiv te je jakost resultantnog električkog polja  $\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_{pn}$  duž puta unutar vodiča jednaka nuli. U protivnom bi i najmanje nenulto resultantno električno polje proizvelo beskonačnu struju u vodiču. Zbog toga je

$$\int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_{1\mu} \cdot d\mathbf{l}_1 = - \int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_1 = -u_1 \quad (6)$$

odnosno

$$u_1 = L_1 \frac{di_{1\mu}}{dt} = -e_{L1}$$

U stručnoj literaturi često se može naći tvrdnja da protuelektromotorna sila u primarnom namotu oponira narinutom naponu, pa čak dodatno i tvrdnja da ona oponira u tolikoj mjeri da, kad bi transformator bio savršen, primarnim bi namotom prestala teći struja<sup>8</sup>. Obje su tvrdnje netočne. Protuelektromotorna sila ne oponira u transformatoru primarno narinutom naponu niti struji primarnog namota po intenzitetu. Ona oponira promjeni struje primarnog namota i “pokušava” održati struju primarnog namota konstantnom; suprotnog je smjera od smjera struje kad se struja povećava, a istog je smjera kad se struja smanjuje. Također, u neopterećenom transformatoru nema povratnog djelovanja sekundarnog namota na primarni namot, što znači da savršenost odnosno nesavršenost transformatora ne igra nikakvu ulogu te će primarnim namotom uvijek teći struja magnetiziranja.

Da bi se odredio napon  $u_2$  na priključcima sekundarnog namota potrebno je Faradayev zakon primijeniti na petlju  $l_2$  koja jednim dijelom prolazi kroz sekundarni namot od priključka (2) do priključka (2'), a drugim dijelom prolazi kroz prostor od priključka (2') do priključka (2). Sekundarni namot je obuhvaćen vrtložnim električnim poljem  $\mathbf{E}_{1\mu}$  i električnim poljem površinskih naboja  $\mathbf{E}_{pn}$ , tako da se izraz za elektromotornu silu međui indukcije, koja djeluje u sekundarnom namotu zbog protjecanja struje magnetiziranja primarnim namotom, može napisati u obliku

$$e_{i2} = \oint_{l_2} \mathbf{E}_{1\mu} \cdot d\mathbf{l}_2 = \int_{(2)}^{(2')} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_{pn}) \cdot d\mathbf{l}_2 + \int_{(2')}^{(2)} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_2 = -M' \frac{di_{1\mu}}{dt}$$

---

<sup>8</sup> Tako, primjerice, piše u [5, str. 2]: „In the primary winding this is the 'back-e.m.f.' and, if the transformer were perfect, it would oppose the primary applied voltage to the extent that no current would flow.“ U većini znanstvene i tehničke literature na našem jeziku engleski naziv *back-e.m.f.* prevodi se kao ‘elektromotorna sila samoindukcije’ ili kao ‘protuelektromotorna sila’.

gdje je sa  $M'$  označena međuinuktivnost između petlji  $l_1$  i  $l_2$ . Zbog visoke permeabilnosti jezgre može se i u ovom slučaju uzeti da je međuinuktivnost između petlji  $l_1$  i  $l_2$  jednaka međuinuktivnosti  $M$  između primarnog i sekundarnog namota, te je

$$e_{i2} = -M \frac{di_{1\mu}}{dt}$$

Unutar savršenog vodiča, neovisno o tome teče li njime struja ili ne, resultantno električno polje uvijek je jednako nuli. To znači da je  $E_{pn} + E_{1\mu} = 0$  duž puta integracije unutar vodiča sekundarnog namota. Zbog toga vrijedi da je

$$\int_{(2)}^{(2')} \mathbf{E}_{1\mu} \cdot d\mathbf{l}_2 = - \int_{(2)}^{(2')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_2$$

te se uzimajući u obzir da je napon na priključcima sekundarnog namota definiran linijskim integralom

$$u_2 = \int_{(2)}^{(2')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_2$$

dobiva da je

$$u_2 = M \frac{di_{1\mu}}{dt} = -e_{i2}$$

Iz provedene analize proizlazi da pri određivanju i interpretaciji protuelektromotorne sile u primarnom namotu  $e_{L1}$  i elektromotorne sile međuinukcije u sekundarnom namotu  $e_{i2}$  nije bilo potrebno posebno spominjati magnetsko polje odnosno magnetski tok transformatora. U svojoj stručnoj literaturi, barem koliko je autoru poznato, uvodi se pri objašnjenju rada transformatora kao ključni faktor pojam magnetskog toka tvrdnjom da promjenljivi magnetski tok uzrokuje pojavu elektromotornih sila u namotima. To, kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, ne proizlazi iz Faradayeva zakona. Proizlazi samo to da isti gibajući i ubrzavajući naboji u vodiču primarnog namota transformatora, formirajući struju magnetiziranja, stvaraju istodobno električno i magnetsko polje čiji su vektori jakosti električnog polja  $\mathbf{E}_{1\mu}$  i magnetske indukcije  $\mathbf{B}$  uzajamno povezani Faradayevim zakonom. Naravno, isto vrijedi i za odgovarajuće integralne veličine – elektromotorne sile u namotima i magnetske tokove.

### 2.3. Opterećeni transformator

Optereti li se transformator radnim trošilom otpornosti  $R$ , slika 4, trošilom će zbog elektromotorne sile međuinukcije uzrokovane postojanjem vrtložnog



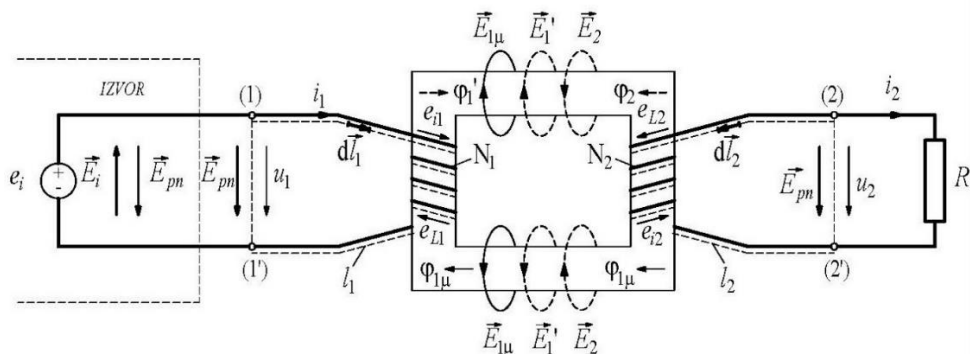
električnog polja jakosti  $\mathbf{E}_{1\mu}$ , poteći struja  $i_2 = u_2 / R$  u smjeru naznačenom na slici. Ta struja stvara vrtložno električno polje jakosti  $\mathbf{E}_2$  suprotnog smjera orijentacije od električnog polja  $\mathbf{E}_{1\mu}$  kao i magnetsko polje čiji je magnetski tok  $\phi_2$  usmjeren suprotno od magnetskog toka  $\phi_{1\mu}$  stvorenog strujom magnetiziranja  $i_{1\mu}$ . U sekundarnom namotu pojavljuje se protuelektromotorna sila<sup>9</sup>

$$e_{L2} = \oint_{l_2} \mathbf{E}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 = \int_{(2)}^{(2')} \mathbf{E}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (7)$$

a u primarnom namotu elektromotorna sila međuindukcije

$$e_{i1} = \oint_{l_1} \mathbf{E}_2 \cdot d\mathbf{l}_1 = \int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_2 \cdot d\mathbf{l}_1 = -M \frac{di_2}{dt} \quad (8)$$

zbog koje primarnim namotom poteče dodatna struja iz izvora  $i_1'$ , tako da je  $i_1 = i_{1\mu} + i_1'$ . Dodatna struja stvara vrtložno električno polje jakosti  $\mathbf{E}_1'$ , koje se smjerom podudara s električnim poljem jakosti  $\mathbf{E}_{1\mu}$ , kao i magnetsko polje čiji se tok  $\phi_1'$  smjerom podudara s magnetskim tokom  $\phi_{1\mu}$ , a suprotnog je smjera od smjera magnetskog toka  $\phi_2$ .



Slika 4: Opterećeni dvonamotni transformator s naznačenim smjerovima električnih polja i elektromotornih sila

Zbog struje  $i_1$  pojavljuje se u primarnom namotu protuelektromotorna sila

$$e_{L1} = \oint_{l_1} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') \cdot d\mathbf{l}_1 = \int_{(1)}^{(1')} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') \cdot d\mathbf{l}_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (9)$$

a u sekundarnom namotu elektromotorna sila međuindukcije

<sup>9</sup> U ovom slučaju, kao i u prethodnim, može se uzeti da je induktivnost petlje  $l_2$  jednaka induktivnosti sekundarnog namota  $L_2$ .

$$e_{i2} = \oint_{l_2} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') \cdot d\mathbf{l}_2 = \int_{(2)}^{(2')} (\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') \cdot d\mathbf{l}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (10)$$

Primarni i sekundarni namot obuhvaćeni su vrtložnim električnim poljem jakosti  $(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2$  i električnim poljem površinskih naboja  $\mathbf{E}_{pn}$  te se izrazi za resultantnu elektromotornu silu  $e_{r1}$  u petlji  $l_1$  i resultantnu elektromotornu silu  $e_{r2}$  u petlji  $l_2$  mogu napisati u obliku

$$e_{r1} = \int_{(1)}^{(1')} [(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{pn}] \cdot d\mathbf{l}_1 + \int_{(1')}^{(1)} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_1$$

$$e_{r2} = \int_{(2)}^{(2')} [(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{pn}] \cdot d\mathbf{l}_2 + \int_{(2')}^{(2)} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_2$$

Namoti su savršeno vodljivi te je resultantno električno polje  $(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{pn}$  unutar vodiča obaju namota jednako nuli. Zbog toga je

$$\int_{(1)}^{(1')} [(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2] \cdot d\mathbf{l}_1 = - \int_{(1)}^{(1')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_1 = -u_1$$

$$\int_{(2)}^{(2')} [(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1') - \mathbf{E}_2] \cdot d\mathbf{l}_2 = - \int_{(2)}^{(2')} \mathbf{E}_{pn} \cdot d\mathbf{l}_2 = -u_2$$

te se, uzimajući u obzir izraze (7–10) dobivaju dvije diferencijalne jednadžbe, tzv. transformatorske jednadžbe

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (11a)$$

$$-u_2 = -M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (11b)$$

pri čemu je  $u_2 = Ri_2$ . Iako izvedene za slučaj radnog trošila, transformatorske jednadžbe vrijede za bilo koju vrstu tošila. One omogućuju da se za poznate parametre transformatora  $L_1$ ,  $L_2$  i  $M$ , poznati valni oblik napona narinutog na primarni namot  $u_1$  te poznate parametre trošila odrede struja trošila (sekundarnog namota)  $i_2$  i struja izvora (primarnog namota)  $i_1$ .

Važno je uočiti da za određivanje struja namota nije potrebno poznavati vrijednosti električnih polja  $(\mathbf{E}_{1\mu} + \mathbf{E}_1')$  i  $\mathbf{E}_2$  u svakoj točki primarnog odnosno sekundarnog kruga transformatora. Dovoljno je samo znati njihove integralne veličine – elektromotorne sile. To je i razlog zašto primjena Faradayeva zakona, prema izrazu (2), kojom je dana veza između elektromotornih sila i pripadnih magnetskih tokova, tako dobro funkcionira u praksi ako su magnetski tokovi poznati. Naime, a to posebno vrijedi za transformatore s feromagnetskom

jezgrom, bitno je lakše odrediti, pa i vizualizirati, magnetske tokove nego vrtložna električna polja. Zbog toga nije neobično da se u inženjerskoj praksi rad transformatora gotovo isključivo objašnjava s pomoću magnetskih tokova.

## 2.4. Naponski i strujni odnosi u savršenom transformatoru

U većini primjena u dobro projektiranim transformatorima s feromagnetskom jezgrom tek se zanemarivi postotak magnetskog toka stvorenog strujama primarnog i sekundnog namota zatvara kroz zrak, tj. izvan jezgre. Zbog toga je u prvoj aproksimaciji analize rada transformatora, uz zadovoljene sve uvodno navedene pretpostavke, razumno pretpostaviti da je transformator savršen<sup>10</sup>, tj. da je sav magnetski tok “zarobljen” u jezgri. Udio magnetskog toka  $\Phi_{12\mu}$  koji prožima oba namota transformatora u ukupnom magnetskom toku  $\Phi_{1\mu}$  izražava se faktorom magnetske veze

$$0 \leq k = \frac{\Phi_{12\mu}}{\Phi_{1\mu}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1$$

što znači da je u savršenom transformatoru faktor magnetske veze  $k = 1$ <sup>11</sup>.

U savršenom transformatoru vrijede između parametara transformatora relacije, [9]

$$\frac{L_1}{M} = \frac{M}{L_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

te uzimajući u obzir da je  $i_1 = i_{1\mu} + i_1'$ , transformatorske jednadžbe (11) poprimaju oblik

$$u_1 = L_1 \frac{d}{dt} \left( i_{1\mu} + i_1' - \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (13a)$$

---

<sup>10</sup> U znanstvenoj i stručnoj literaturi često se miješaju pojmovi savršenog i idealnog transformatora. Zbog nespretno odabranog naziva ‘idealni transformator’ kao i električkog simbola koji je identičan električkom simbolu transformatora, idealni transformator se često kategorizira kao posebna vrsta transformatora. U udžbenicima o transformatorima obično se spominje kao najviši stupanj idealizacije stvarnog transformatora i pri tome zaboravlja da idealni transformator nije uopće transformator nego dvoprilazni otpor. O tome više u udžbenicima iz teorije električkih mreža.

<sup>11</sup> Savršena magnetska veza u stvarnom svijetu je neostvariva. Naime, u tom bi slučaju namoti morali fizički koincidirati. Drugim riječima, morali bi imati potpuno isti oblik i zauzimati isto mjesto u prostoru, što je naravno nemoguće. No, pri realizaciji transformatora s feromagnetskom jezgrom može se, ako se želi, postići faktor magnetske veze od 0,99 do čak 0,998, te je analiza rada takvih transformatora kao savršenih tehnički opravdana.

$$Ri_2 = \frac{N_2}{N_1} L_1 \frac{d}{dt} \left( i_{1\mu} + i_1' - \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (13b)$$

Primarni namot priključen je na idealni izvor elektromotorne sile  $e_i = u_1$ , a zbog zanemarene otpornosti i rasipne induktivnosti primarnog namota, napon narinut na primarni namot ostaje nepromijenjen neovisno o opterećenju transformatora. To znači da se, unatoč protjecanju struje trošila i dodatne struje primarnog namota, magnetski tok  $\varphi_{1\mu}$  stvoren strujom magnetiziranja ne može promijeniti. Proizlazi da u savršenom transformatoru postoji samo električno polje  $E_{1\mu}$  stvoreno strujom magnetiziranja  $i_{1\mu}$ , a da se električna polja  $E_1'$  i  $E_2$  kao i magnetski tokovi  $\varphi_1'$  i  $\varphi_2$  stvoreni strujama  $i_1'$  i  $i_2$  međusobno poništavaju, tj. vrijedi da je

$$E_1' - E_2 = 0; \quad \varphi_1' - \varphi_2 = 0$$

Prema pretpostavci 2.1.b) je  $N_1\varphi_1' = L_1 i_1'$  odnosno  $N_2\varphi_2 = L_2 i_2$ , te se, uzimajući u obzir da je  $\varphi_1' = \varphi_2$  kao i relacije (12) između parametara savršenog transformatora, dobiva da je

$$i_1' = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (14)$$

Uvrštenjem izraza (14) u transformatorske jednadžbe (13) dobivaju se izrazi za struje namota savršenog transformatora

$$i_2 = \frac{N_2}{N_1} \frac{u_1}{R}$$

$$i_1 = i_{1\mu} + i_1' = i_{1\mu} + \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{1\mu} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{u_1}{R}$$

Budući da je magnetski tok  $\varphi_{1\mu}$  jednak na svakom presjeku jezgre, za svaku petlju (zatvoreni put)  $l$  koja tvori jedan zavoj oko stupa ili jarma transformatora, vrijedi prema Faradayevom zakonu da je

$$\oint_l \mathbf{E}_{1\mu} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\varphi_{1\mu}}{dt} = -\frac{u_1}{N_1} = -\frac{u_2}{N_2} \quad (15)$$

tj. da u savršenom transformatoru između napona primarnog i sekundarnog namota vrijedi relacija

$$\frac{u_1}{N_1} = \frac{u_2}{N_2}$$

### 3. Prijenos energije

U do sada provedenoj analizi rada transformatora korišten je samo Faradayev zakon elektromagnetske indukcije. Za odabrani najjednostavniji model, ali u kojem se još ogledaju sva osnovna svojstva transformatora, dobivene su transformatorske jednadžbe na temelju kojih se za poznate parametre transformatora mogu odrediti struje namota i napon na izlaznim priključcima transformatora. Na prvi pogled izgleda da su u pravu oni autori koji tvrde da se rad transformatora može objasniti pozivajući se samo na Faradayev zakon. Preostaje još samo odgovoriti na najvažnije pitanje: "Kako se transformatorom prenosi električna energija između dva (ili više) galvanski odvojena sustava?"

Kao što je u uvodu istaknuto u literaturi se uglavnom prijenos energije smatra samorazumljivim. Ako se katkad eksplicitno i postavi pitanje prijenosa energije obično se kaže da se energija prenosi elektromagnetskom indukcijom, što je netočno<sup>12</sup>, ili se češće samo navodi da se rad transformatora, a time implicitno i prijenos energije, zasniva na Faradayevom zakonu, što je tek dio ispravnog objašnjenja. To dobro ilustrira nekoliko odabranih citata iz udžbenika i monografija:

- a) Osnovna zadaća transformatora je da prenosi energiju izmjenične struje od izvora do priključenog trošila na principu međuinstrukcije posredstvom magnetskog toka.
- b) Transformator sadrži dva što tjesnije induktivno vezana svitka, primarni i sekundarni, od kojih primarni ima da iz danog izvora uzima energiju, koju, induktivno prenesenu na sekundarni svitak, ovaj potonji daje priključenom potrošaču.
- c) Magnetskim poljem glavnog toka prenosi se energija iz primara u sekundar transformatora.
- d) Električna energija prenosi se elektromagnetskom indukcijom od primara na sekundar, bez promjene frekvencije.
- e) Transformator je elektromagnetski pretvarač u kojem se električna energija preuzeta primarnim namotom prvo pretvara u magnetsku energiju koja se zatim ponovno pretvara u električnu energiju upotrebljivu u drugim krugovima (sekundarni namot, tercijarni namot, itd.).
- f) Transformatori su uređaji koji prenose energiju iz jednog kruga u drugi s pomoću zajedničkog magnetskog polja.

---

<sup>12</sup> Energija se iz nekog sustava prenosi u okolinu topline (zbog temperaturne razlike između sustava i okoline), mehaničkim radom (zbog djelovanja sila sustava na okolinu ili sila okoline na sustav), električnim prijenosom (zbog posmičnog gibanja električno nabijenih čestica – naboja), elektromagnetskim zračenjem (zbog ubrzanog gibanja električno nabijenih čestica), prijenosom tvari i mehaničkim valovima [21].

### 3.1. Objašnjenje u okviru teorije električkih mreža

U transformatorskim jednadžbama (11) pojavljuju se kao varijable jedino naponi i struje prilaza, dakle, varijable koje predstavljaju primitivne pojmove teorije električkih mreža. Zbog toga je logično postaviti pitanje: "Može li se u okviru teorije električkih mreža objasniti prijenos energije transformatorom?"

Odgovor je nedvosmisleno niječan. Razlog leži u samim temeljima teorije električkih mreža. Teorija električkih mreža bavi se jedino električki malenim mrežama odnosno kvazistatičkim sustavima, među koje spadaju i transformatori napajani iz javne izmjenične mreže. Prema postulatima teorije električkih mreža električki malene mreže ne zauzimaju realan prostor. Pojmovi koji su vezani uz prostorno širenje elektromagnetskih pojava, kao što su električno polje, magnetsko polje, interakcija polja i materije ne postoje u teoriji električkih mreža. Sâm termin 'prijenos energije' implicira da "nešto" prolazi zamišljenom ili stvarnom granicom sustava koja ga dijeli od okoline i ne može se objasniti bez uzimanja u obzir fizičkih dimenzija sustava. Proizlazi da prijenos energije nije objašnjiv u okviru teorije električkih mreža nego samo u okviru teorije elektromagnetskog polja.

Osnovna odlika teorije električkih mreža jest da uvođenjem pojma elementa mreže<sup>13</sup> omogućuje izgradnju nadomjesnih shema spojeva stvarnih naprava (uređaja) i određivanje naponsko-strujnih odnosa na prilazima tih naprava u po volji složenim električkim mrežama. No, ono što se odigrava unutar neke naprave ostaje nedostupno proučavanju metodama teorije električkih mreža. To, naravno, vrijedi i za transformatore. Iz transformatorskih jednadžbi (11) mogu se s pomoću elemenata mreže stvoriti različite nadomjesne sheme spoja transformatora, no one su samo grafički prikaz tih jednadžbi i ništa više. Elementima mreže tih nadomjesnih shema spojeva katkad se može, ali u pravilu ne treba, pridijeliti neko fizikalno značenje.

Što se tiče prijenosa energije, najviše što teorija električkih mreža može jest da na temelju zakona o lokalnom očuvanju energije dâ opći uvjet za prijenos energije transformatorom. Pokazuje se da je prijenos energije između dva namota uzajamno vezana zajedničkim električnim poljem moguć samo ako struje prilaza (namota) transformatora  $i_1$  i  $i_2$  nisu međusobno proporcionalne, tj. ako vrijedi da je [22]:

$$i_1 \neq A i_2 ; \quad A = \text{konstanta}$$

---

<sup>13</sup> Element mreže je model kojim je predložen jedan fizikalni proces u modeliranoj napravi. Tako je induktivitetom predloženo uskladištenje magnetske energije, kapacitetom uskladištenje elektrostatičke energije, a otporom transformacija električne energije u neki drugi oblik kao i obratan proces.

### 3.2. Objašnjenje u okviru teorije elektromagnetskog polja

#### Poyntingov vektor

Teorija elektromagnetskog polja objašnjava prijenos energije između fizičkih objekata protjecanih električnim strujama oslanjajući se na eksperimentalnu činjenicu da se elektromagnetska sila širi prostorom konačnom brzinom od jednog fizičkog objekta do drugog fizičkog objekta i na načelo lokalnosti, prema kojem ako djelovanje jednog fizičkog objekta utječe na djelovanje prostorno udaljenog drugog fizičkog objekta, tada u međuprostoru mora postojati posrednik kojim se to djelovanje prenosi. U transformatoru ti fizički objekti su primarni namot i sekundarni namot, a posrednik kojim se prenosi djelovanje primarnog namota na sekundarni namot i obratno je elektromagnetsko polje.

Iz navedenih premisa, Maxwellovih jednadžbi i izraza za elektromagnetsku silu, engleski fizičari Oliver Heaviside i John Poynting izveli su, nezavisno jedan od drugog, zakon o lokalnom očuvanju energije za bilo koji fizički sustav u kojem postoje električne struje i to u terminima snage. Taj se zakon danas uobičajeno naziva Poyntingov teorem, a vektorska veličina

$$\mathbf{P}_v = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad \frac{W}{m^2} \quad (16)$$

Poyntingov vektor, gdje je  $\mathbf{H}$  jakost magnetskog polja u točki prostora u kojoj postoji i električno polje jakosti  $\mathbf{E}$ . Poyntingov vektor jednak je jakosti toka energije (snazi) koja prolazi kroz jedinicu površine stvarne ili zamišljene zatvorene plohe  $S$  koja promatrani fizički objekt ili sustav odjeljuje od okoline (drugih fizičkih objekata ili sustava). Električna snaga koja “prolazi” zatvorenom plohom  $S$  jednaka je

$$p(t) = \oiint_S \mathbf{P}_v \cdot \mathbf{n} ds$$

gdje je  $\mathbf{n}$  jedinični vektor okomit na diferencijal plohe  $ds$  i dogovorno se uzima da je pozitivan ako je usmjeren prema okolini.

#### Komponente Poyntingova vektora unutar transformatora

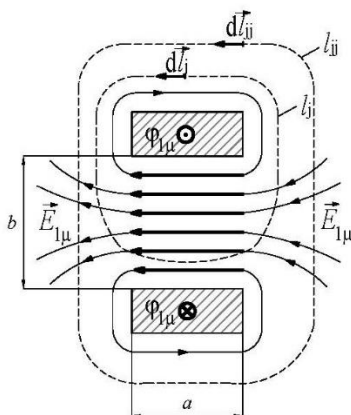
Za prijenos energije elektromagnetskim poljem nužno je, prema izrazu (16), istodobno postojanje obiju komponenata elektromagnetskog polja: električnog polja  $\mathbf{E}$  i magnetskog polja  $\mathbf{H}$ . Kriterij prema kojem se određuje koje su od komponenata električnog polja  $\mathbf{E}$  odnosno magnetskog polja  $\mathbf{H}$  odgovorne za prijenos energije unutar transformatora, tj. između namota transformatora, jest da

ulazna snaga transformatora  $u_1 i_1$  mora biti proporcionalna modulu Poyntingova vektora uz primarni namot transformatora kao i da izlazna snaga transformatora  $u_2 i_2$  mora biti proporcionalna modulu Poyntingova vektora uz sekundarni namot transformatora.

Prijenos energije objasniti će se, jednostavnosti radi, na primjeru prijenosa energije savršenim transformatorom.

**Električno polje  $E$ .** U analizi rada transformatora pojavljuju se tri komponente električnog polja  $E$ . To su: električno polje  $E_{1\mu}$  stvoreno strujom magnetiziranja  $i_{1\mu}$ , električno polje  $E_2$  stvoreno strujom trošila  $i_2$  i električno polje  $E_1'$  stvoreno dodatnom strujom izvora  $i_1'$ .

U savršenom transformatoru električna polja  $E_2$  i  $E_1'$  međusobno se poništavaju, što znači da unutar transformatora postoji samo električno polje  $E_{1\mu}$ . Ono je, prema izrazu (6), proporcionalno naponu narinutom na primarni namot  $u_1$  i predstavlja jednu od komponenata elektromagnetskog polja odgovornih za prijenos energije transformatorom.



Sl. 5 Kvalitativni prikaz električnog polja u prozoru transformatora

Slika 5 prikazuje nekoliko karakterističnih silnica električnog polja  $E_{1\mu}$  u ravni presjeka jarmova A – A' (slika 3), pri čemu je sa  $a$  označena dubina prozora, a sa  $b$  visina prozora transformatora. Budući da je transformator savršen, magnetski tok  $\phi_{1\mu}$  u gornjem jarmu jednak je po iznosu i suprotnog je smjera od magnetskog toka  $\phi_{1\mu}$  u donjem jarmu. Proizlazi da je električno polje  $E_{1\mu}$  simetrično s obzirom na gornji i donji jaram, ali ne i jednoliko raspodijeljeno oko jarmova. Uočava se, naime, da je električno polje  $E_{1\mu}$  koncentrirano u prozoru transformatora jer se silnice električnog polja unutar prozora transformatora podudaraju po smjeru, a izvan prozora su suprotnog smjera i poništavaju se. Da je električno polje izvan prozora transformatora jednako nuli lako se uviđa primijeni li se Faradayev zakon na bilo koji zatvoreni put  $l_{ij}$  izvan prozora transformatora koji obuhvaća oba jarma. Zbog suprotnih smjerova magnetskog



toka u gornjem i donjem jarmu, resultantni magnetski tok koji prožima zatvoreni put (petlju)  $l_{jj}$  jednak je nuli te je i pripadna elektromotorna sila

$$e_{jj} = \oint_{l_{jj}} \mathbf{E}_{1\mu} d\mathbf{l}_{jj} = 0$$

No, električno polje  $\mathbf{E}_{1\mu}$  je nekonzervativno (vrtložno) te je elektromotorna sila  $e_{jj}$  duž bilo koje petlje  $l_{jj}$  jednaka nuli jedino ako je električno polje  $\mathbf{E}_{1\mu}$  izvan prozora transformatora jednako nuli.

S druge strane, za bilo koju petlju  $l_j$  koja obuhvaća ili gornji jaram ili donji jaram vrijedi izraz (15), a jer je električno polje  $\mathbf{E}_{1\mu}$  izvan prozora transformatora jednako nuli, dobiva se da je

$$\oint_{l_j} \mathbf{E}_{1\mu} d\mathbf{l}_j = -\frac{u_1}{N_1} = -\frac{u_2}{N_2} = -E_{1\mu} \cdot a$$

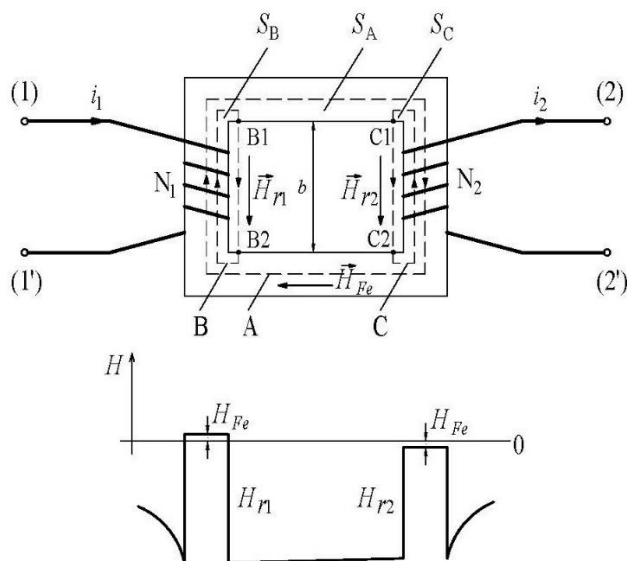
odakle proizlazi da je modul vektora  $\mathbf{E}_{1\mu}$ , tj. vrijednost električnog polja koje djeluje unutar prozora transformatora jednaka

$$E_{1\mu} = \frac{u_1}{aN_1} = \frac{u_2}{aN_2}$$

**Magnetsko polje  $\mathbf{H}$ .** Da bi se odredilo magnetsko polje  $\mathbf{H}$  odgovorno za prijenos energije unutar transformatora, potrebno je primijeniti Ampérov zakon na zadanu konfiguraciju namota i jezgre transformatora, prema slici 6. Odmah se uočavaju tri karakteristična zatvorena puta duž kojih se može integrirati vektor jakosti magnetskog polja  $\mathbf{H}$ . Prvi zatvoreni put A cijelom svojom duljinom prolazi kroz jezgru i obuhvaća oba namota. Drugi zatvoreni put B jednim dijelom od točke B2 do točke B1 prolazi kroz jezgru, a drugim dijelom kroz prostor između jarmova transformatora od točke B1 do točke B2, obuhvaćajući samo primarni namot, dok treći zatvoreni put C jednim dijelom od točke C2 do točke C1 prolazi kroz jezgru, a drugim dijelom kroz prostor između jarmova transformatora od točke C1 do točke C2, obuhvaćajući samo sekundarni namot.

Kroz površinu  $S_A$ , omeđenu zatvorenim putem A, struja primarnog namota  $i_1$  prolazi  $N_1$  puta u jednom smjeru, a struja sekundarnog namota  $i_2$   $N_2$  puta u suprotnom smjeru. Zbog toga su, prema Ampérovom zakonu, magnetsko polje u jezgri  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{Fe}$  i struje namota povezani relacijom

$$\oint_A \mathbf{H}_{Fe} d\mathbf{l} = N_1 i_1 - N_2 i_2$$



Slika 6 Kvalitativni prikaz vrijednosti vektora magnetskog polja  $\mathbf{H}$  u jezgri i u prostoru oko jezgre transformatora

Rastavi li se struja primarnog namota  $i_1$  na struju magnetiziranja  $i_{1\mu}$  i dodatnu struju izvora  $i_1'$ , te uzimajući u obzir da u savršenom transformatoru napon  $u_1$  narinut na primarni namot ostaje nepromijenjen neovisno o opterećenju transformatora zbog čega ostaje nepromijenjen magnetski tok u jezgri  $\phi_{1\mu}$  kao i jakost magnetskog polja  $\mathbf{H}_{Fe}$ , proizlazi da je

$$\oint_A \mathbf{H}_{Fe} d\mathbf{l} = N_1(i_{1\mu} + i_1') - N_2 i_2 = N_1 i_{1\mu} \quad (17)$$

tj. mora vrijediti jednakost<sup>14</sup>

$$N_1 i_1' = N_2 i_2$$

Iz izraza (17) proizlazi da je magnetsko polje u jezgri  $\mathbf{H}_{Fe}$  proporcionalno struji magnetiziranja  $i_{1\mu}$  odnosno naponu  $u_1$  te da ne ovisi o struji trošila  $i_2$  ni o dodatnoj struji iz izvora  $i_1'$ . To ujedno znači da magnetsko polje  $\mathbf{H}_{Fe}$  ne sudjeluje u prijenosu energije između namota.

Kroz površinu  $S_B$ , omeđenu zatvorenim putem B, struja primarnog namota  $i_1$  prolazi  $N_1$  puta te će prema Ampérovom zakonu vrijediti da je

<sup>14</sup> Ta je jednakost dobivena i u odjeljku 2.4, izraz (14), bez pozivanja na Ampérov zakon.

$$\oint_B \mathbf{H}_{Fe} d\mathbf{l} = \int_{B_2}^{B_1} \mathbf{H}_{Fe} d\mathbf{l} + \int_{B_1}^{B_2} \mathbf{H}_r d\mathbf{l} = N_1 i_1$$

Zbog visoke relativne permeabilnosti jezgre ( $\mu_r \gg 1$ ), magnetsko polje u jezgri  $\mathbf{H}_{Fe}$  zanemarivo je u odnosu na magnetsko polje između jarmova  $\mathbf{H}_r$  te se s dovoljnom točnošću može uzeti da je

$$\int_{B_1}^{B_2} \mathbf{H}_r d\mathbf{l} = H_{r1} \cdot b = N_1 i_1$$

odnosno da je vrijednost vektora magnetskog polja  $\mathbf{H}$  uz primarni namot jednaka

$$H_{r1} = \frac{N_1 i_1}{b}$$

Analognim postupkom, primijeni li se Ampérov zakon na zatvoreni put C kojim je obuhvaćen samo sekundarni namot, dobiva se da je vrijednost vektora magnetskog polja  $\mathbf{H}$  uz sekundarni namot jednaka

$$H_{r2} = \frac{N_2 i_2}{b}$$

Magnetsko polje između jarmova transformatora  $\mathbf{H}_r$ , kvalitativni prikaz kojega je dan na slici 6, jest rasipno polje jer obuhvaća ili primarni namot ili sekundarni namot, pri čemu su vrijednosti vektora magnetskog polja  $H_{r1}$  odnosno  $H_{r2}$  proporcionalne struji primarnog namota odnosno struji sekundarnog namota. Zbog konačne magnetske vodljivosti jezgre vrijednost vektora magnetskog polja  $H_{r1}$  neznatno je veća od  $H_{r2}$  te se u prostoru između jarmova (prozoru transformatora) može s dovoljnom točnošću pretpostaviti da djeluje rasipno magnetsko polje  $\mathbf{H}_r$  srednje vrijednosti

$$H_r = \frac{H_{r1} + H_{r2}}{2} \approx H_{r1} \approx H_{r2}$$

koje uz električno polje  $\mathbf{E}_{1\mu}$  predstavlja drugu komponentu elektromagnetskog polja odgovornu za prijenos energije između namota transformatora.

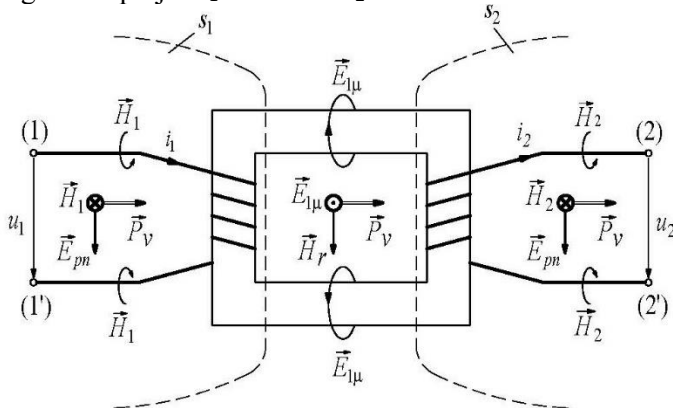
## Prijenos energije elektromagnetskim poljem

Iz prethodnih razmatranja proizlazi da je jakost toka energije (snaga) koja prolazi kroz jediničnu površinu prozora transformatora na bilo kojem presjeku jarmova određena Poyntingovim vektorom

$$\mathbf{P}_v = \mathbf{E}_{1\mu} \times \mathbf{H}_r$$

usmjerenim od primarnog namota prema sekundarnom namotu, slika 7. Proizlazi da se energija ne prenosi jezgrom nego prostorom oko jezgre, pri čemu je sva elektromagnetska energija koncentrirana u prozoru transformatora. U promatranom “školskom” primjeru izvedbe jezgre i namota jarmovi transformatora služe samo za usmjeravanje električne energije od primarnog namota prema sekundarnom namotu<sup>15</sup>.

Uočljiva je analogija između uloga gornjeg i donjeg jarma transformatora u prijenosu energije od primarnog namota do sekundarnog namota i uloga parova vodiča u prijenosu energije od izvora elektromotorne sile do primarnog namota i od sekundarnog namota do trošila, slika 7. Rasipnom magnetskom polju  $\vec{H}_r$  između jarmova transformatora odgovara električno polje površinskih naboja  $\vec{E}_{pn}$  između vodiča, dok vrtložnom električnom polju  $\vec{E}_{1\mu}$  oko jezgre odgovara vrtložno magnetsko polje  $\vec{H}_1$  odnosno  $\vec{H}_2$  oko vodiča.



Sl. 7 Smjerovi vektora električnog polja, magnetskog polja i Poyntingova vektora u prostoru unutar prozora transformatora i izvan transformatora

Budući da je magnetsko polje u jezgri  $\vec{H}_{Fe}$  zanemarivo u odnosu na rasipno magnetsko polje  $\vec{H}_r$ , vektori električnog polja  $\vec{E}_{1\mu}$  i magnetskog polja  $\vec{H}_r$  međusobno su okomiti, te je vrijednost Poyntingova vektora  $\vec{P}_v$  jednaka

$$P_v = |\vec{E}_{1\mu} \times \vec{H}_r| = E_{1\mu} \cdot H_r = \frac{u_1}{aN_1} \cdot \frac{N_1 i_1}{b} = \frac{u_2}{aN_2} \cdot \frac{N_2 i_2}{b} = \frac{u_1 i_1}{ab} = \frac{u_2 i_2}{ab}$$

Električno polje  $\vec{E}_{1\mu}$  izvan prozora transformatora jednako je nuli, pa se područje na kojem električna snaga izlazi iz zatvorene plohe  $S_1$  koja obuhvaća samo primarni namot, slika 7, svodi na otvorenu plohu prozora transformatora

<sup>15</sup> O prijenosu energije transformatorom za druge tehničke konfiguracije jezgre i namota više u [13].

površine  $ab$ . Jedinični vektor  $\mathbf{n}$  na plohi  $S_1$  usmjeren je prema okolini i pozitivne je vrijednosti, te je električna snaga koja izlazi iz plohe  $S_1$  jednaka

$$p_1 = \oiint_{S_1} (\mathbf{E}_{1\mu} \times \mathbf{H}_r) \cdot \mathbf{n} ds = \frac{u_1 i_1}{ab} \cdot (ab) = u_1 i_1$$

Analogno tomu, jedinični vektor  $\mathbf{n}$  na plohi  $S_2$  usmjeren je prema sustavu (sekundarnom namotu) i negativne je vrijednosti, te je električna snaga koja ulazi u plohu  $S_2$  jednaka

$$p_2 = \oiint_{S_2} (\mathbf{E}_{1\mu} \times \mathbf{H}_r) \cdot \mathbf{n} ds = \frac{u_2 i_2}{ab} \cdot (-ab) = -u_2 i_2$$

S obzirom na to da je na svakom presjeku jarmova transformatora  $A - A'$ , slika 3, Poyntingov vektor jednak po iznosu i smjeru, za svaki presjek unutar prozora transformatora vrijedi da je  $p_1 + p_2 = 0$ , odnosno da je

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 \quad (18)$$

Do jednakosti (18) lako se dolazi izravno, ako se uzme u obzir da je transformator kvazistatički sustav, tj. električki malena mreža. Naime, za svaki kvazistatički sustav obuhvaćen zatvorenom plohom  $S$  koji je povezan s okolinom s pomoću  $k$  prilaza (parova vodiča) vrijedi da je

$$-\oiint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} ds = \sum_{j=1}^k u_j i_j \quad (19)$$

gdje je  $u_j$  napon  $j$ -tog prilaza,  $i_j$  struja  $j$ -tog prilaza, a  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{H}$  su vektori električnog i magnetskog polja na zatvorenoj plohi  $S$ , [23].

Prema polaznim pretpostavkama u transformatoru nema gubitaka snage. To znači da ako transformator u potpunosti obuhvatimo zatvorenom plohom  $S$  sva energija koja ulazi u tu plohu jednaka je energiji koja iz te plohe izlazi te vrijedi da je

$$-\oiint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} ds = 0 = -u_1 i_1 + u_2 i_2$$

odakle proizlazi jednakost (18).

U stručnoj literaturi ta se jednakost često koristi prilikom objašnjenja prijenosa energije transformatorom. No, ta jednakost, kad je dobivena iz izraza (19), samo izriče, iz jednakosti trenutačnih snaga primarnog i sekundarnog namota transformatora, da je prijenos energije ostvaren, ali ne govori ništa o tome što se događa unutar transformatora, tako da način prijenosa energije transformatorom ostaje neobjašnjiv.

## Zaključna razmatranja

Rad transformatora zasniva se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije i Amperéovom zakonu struje, dvama zakonima koji, zajedno s Gaussovim zakonima za električno polje odnosno magnetsko polje, čine temelj teorije elektromagnetskog polja. Ti zakoni omogućuju objašnjenje rada transformatora neovisno o vrsti analiziranih transformatora i njihovim primjenama. Najčešće upotrebljavana vrsta transformatora i primjena, o čemu postoji najopsežnija stručna literatura, su energetske transformatori priključeni na javnu izmjeničnu mrežu. Sa stajališta teorije elektromagnetskog polja transformatori u toj primjeni predstavljaju električki malene mreže te se oni, barem načelno, mogu analizirati metodama teorije električkih mreža koristeći skalarne varijable napona i struja prilaza.

Teorija električkih mreža je pojmovno i što se tiče potrebnog matematičkog aparata bitno jednostavnija od teorije elektromagnetskog polja. Inženjersku praksu odlikuje svrsishodnost zbog čega nije neobično da se u stručnoj literaturi – monografijama, udžbenicima i stručnim člancima – rad transformatora najčešće pokušava objasniti svojevrsnom mješavinom pojmova iz teorije elektromagnetskog polja i teorije električkih mreža. To, međutim, kod pozornijeg čitatelja može stvoriti poteškoće pri razumijevanju jer se fizikalne veličine elektromagnetskog polja ne mogu na zadovoljavajući način modelirati diskretnim elementima mreže niti se elektromagnetske pojave mogu korektno analizirati koristeći postulate teorije električkih mreža.

Primjerice, Kirchhoffov zakon napona kao jedan od postulata teorije električkih mreža, iskaže li se u terminima teorije elektromagnetskog polja, tvrdi da je linijski integral vektora električnog polja duž nekog zatvorenog puta (petlje) identički jednak nuli, dok upravo činjenica da taj linijski integral nije jednak nuli predstavlja polazište u razumijevanju rada transformatora. Također, čest je slučaj da se neka svojstva transformatora objašnjavaju uz pomoć nadomjesnih spojeva elemenata mreže i pri tome zaboravlja da nadomjesne sheme spojeva omogućuju jedino analizu naponsko-strujnih odnosa na prilazima transformatora, a ne i objašnjenje onoga što se događa u transformatoru. Ta, i slična pogrešna objašnjenja mogu se izbjeći ako se analiza rada transformatora striktno provede u okviru teorije elektromagnetskog polja.

Razliku između analize rada transformatora striktno provedene u okviru teorije elektromagnetskog polja i analize rada transformatora provedene u okviru teorije električkih mreža najlakše je uočiti na dva karakteristična problema. Prvi se problem odnosi na dobivanje transformatorskih jednadžbi, jednadžbi koje omogućuju proračun naponsko-strujnih odnosa na prilazima transformatora. U okviru teorije električkih mreža te se jednadžbe, primjerice, za dvonamotni transformator ne mogu izvesti nego se postuliraju kao konstitutivne relacije

dvoprilaznog reaktivnog elementa mreže i praktički se smatraju samorazumljivim. U okviru teorije elektromagnetskog polja, kako je to pokazano u članku, te se jednačbe dobivaju dosljednom primjenom nekauzalno interpretiranog Faradayeva zakona na dva zatvorena puta (petlje) unutar transformatora. Do istih se transformatorskih jednačbi može doći i ako se Faradayevom zakonu pogrešno pripiše kauzalnost, zbog čega se objašnjenja temeljena na kauzalnosti tog zakona i danas nalaze u literaturi o transformatorima.

Drugi se problem odnosi na objašnjenje prijenosa energije transformatorom. U okviru teorije električnih mreža prijenos energije između dva galvanski odvojena namota najčešće se objašnjava jednakošću djelatnih snaga namota, odnosno pod određenim uvjetima jednakošću trenutačnih snaga namota, čime ustvari način prijenosa energije nije uopće objašnjen. U okviru teorije elektromagnetskog polja dobiva se fizikalno, ali protuintuitivno, objašnjenje prema kojem je nužan uvjet prijenosa energije postojanje rasipnog magnetskog polja u prozoru transformatora. Budući da se transformator fizički ne može realizirati, a da ne postoji rasipno magnetsko polje, ta činjenica, ma kako bila zanimljiva, nema utjecaja na projektiranje transformatora. Unatoč tomu, prema mišljenju autora, bilo bi dobro da se u monografijama i udžbenicima o transformatorima kao i u naprednijim udžbenicima iz osnova elektrotehnike dâ fizikalno utemeljeno objašnjenje prijenosa energije, kako bi se stekla jasnija fizikalna slika, a time i dublje razumijevanje rada transformatora.

## Literatura

- [1] Kapp, G., *Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom – Eine Darstellung ihrer Theorie, Konstruktion und Anwendung*, Julius Springer Verlag, 1907.
- [2] Vidmar, M., *Die Transformatoren*, Verlag Birkhauser, Basel, 1956.
- [3] Blume, L. F. et al, *Transformer Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1951.
- [4] – , *Magnetic Circuits and Transformers*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, January 1965.
- [5] Heathcote, M., *The J&P Transformer Book*, Newness, Butterworth–Heineman, Twelfth edition, Oxford, 1998.
- [6] Dolenc, A., *Transformatori – Svezak I, Svezak II*, Sveučilište u Zagrebu, 1961.
- [7] Kelemen, T., *Transformator, Tehnička enciklopedija*, Leksikografski zavod “Miroslav Krleža”, Zagreb, 1997., Svezak 13, str. 148 – 168
- [8] Rosser, G., *Interpretation of Classical Electromagnetism*, Springer–Science +Business Media, B. V., 1997.
- [9] Popović, B., *Osnovi elektrotehnike II*, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.

- [10] Beck, F., Pacholder, A., Energy flow in transformers, *IEEE Transactions on Education*, December 1967, pp. 248 – 254
- [11] Herrmann, F., Schmid, B., The Poynting vector field and the energy flow within a transformer, *American Journal of Physics*, Vol. 54 (6), June 1986, pp. 528 – 531
- [12] Mc Donald, Energy flow in a transformer, Princeton University, Princeton, NJ 08544, <http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/transformer.pdf> (02. 02. 2021.)
- [13] Edwards, J., Saha, T.K., Power flow in transformers via the Poynting vector, Queensland University <https://www.researchgate.net/publication/43483876> (02.02. 2021.)
- [14] Ferreira, J.A., *Electromagnetic Modelling of Power Electronic Converters*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [15] Winders, J.J., *Power Trasformer Principles and Applications*, Marcel Dekker versityInc., New York, Basel, 2002.
- [16] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A., *Transformer Engineering*, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 2004.
- [17] Jefimenko, O.D., *Electricity and Magnetism*, Appleton – Century – Crofts, New York, 1966.
- [18] Jefimenko, O.D., Presenting electromagnetic theory in accordance with the principle of causality, *European Journal of Physics*, Vol. 25, 2004., pp. 287 – 296
- [19] Purcell, E.M., *Elektricitet i magnetizam*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- [20] Flegar, I., O električnoj energiji, *Povijest i filozofija tehnike*, Kiklos – Krug knjige, Zagreb, 2020., str. 169 – 191
- [21] Serway, R.A., Jewett, J.W., *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, Brooks/Cole, Boston, 2014.
- [22] Flegar, I., Energy transfer between inductively coupled circuits, *Tehnički vjesnik*, Vol. 1, br. 1, 1994., str. 1 – 5
- [23] Haus, H. A., Melcher, J. R., *Electromagnetic fields and energy*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

*Ivan Flegar*

## PHYSICAL FOUNDATIONS OF TRANSFORMER OPERATION

**Abstract:** Transformer operation is explained in electrotechnical literature by using causal interpretation of Faraday’s law of electromagnetic induction. The energy transfer as a basic transformer task is either not explained at all or explained in terms of the electrical network theory. Causal interpretation of the Faraday’s law of electromagnetic induction, leading nevertheless to the correct conclusions on transformer operation, is not in accordance with the generally accepted concept of the electromagnetic field in physics. Electrical network



theory can only explain the voltage-current relations at transformer ports. What is occurring inside the transformer, like the energy transfer between transformer windings, is beyond the scope of electrical network theory. In the framework of electromagnetic field theory by using noncausal interpretation of Faraday's law of electromagnetic induction and of Poynting theorem as well, a correct explanation of transformer operation is given in the article using the example of a two-winding transformer with ferromagnetic core.

**Key words:** causality, electric field, energy transfer, magnetic field, Poynting's vector



## PHILOSOPHICAL IMPLICATIONS OF EMMY NOETHER'S THEOREM – CONNECTION OF SYMMETRIES AND CONSERVATION LAWS

Dragan Poljak, Mirko Jakić, University of Split

*The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve.*

*Eugene Wigner*

### Abstract:

There are physical quantities that remain constant throughout the time evolution of a physical system. Such quantities are regarded to be conserved under certain conditions which is governed by corresponding conservation laws. Furthermore, it can be shown that conservation laws are consequence of the symmetry properties of a physical system, i.e. invariance properties of a system. These symmetry properties of the system and related conservation laws stem from Emmy [Noether's theorem](#).

Generally, when a functional in the variational calculus, i.e. *action*, is [extremal](#), Emmy [Noether's theorem](#) yields the conservation law. Thus, invariance of the system under a time translation leads to the energy conservation, a space translation invariance corresponds to the conservation of linear momentum, rotation invariance corresponds to the conservation of angular momentum, while gauge invariance yields the conservation of electric charge.

From the philosophical point of view, one deals with a path of unification of mathematics and physics, even with connection of the epistemic and ontic aspects, as fundamental laws of nature are governed by the equations having a beautiful inherent symmetry. This work deals with philosophical and physical implications of Emmy [Noether's theorem](#).

Keywords: Emmy Noether's theorem, symmetries, conservation laws, philosophical aspects

## 1 Introduction

Problem of connection of mathematics and real world, i.e. (un)reasonable effectiveness of mathematics in natural sciences [1] still initiates long and deep philosophical discussions, e.g. [2]. Furthermore, modern physics explains the conservation of charge in electromagnetism by using the local symmetry, so called gauge symmetry, which essentially stems from mathematics. On the other hand, many researchers and philosophers address mathematical models simply with kind of instrumentalism, which could be always extended and improved, and they actually deny a connection of mathematics with deeper principles of natural world, i.e. of objective reality.

Finally, Bohr claims that models are just useful tool to make predictions of the measurement outcomes and he does not connect these mathematical models with reality, itself. Bohr's attitude is in opposition to Einstein's God who does not play dice,

Physical laws can be described by the action while the symmetry of the law corresponds to the invariance of the action under various transformations, According to [Noether's theorem](#), certain action symmetry corresponds to conserved quantities [3-7]. Namely, there are physical quantities that do not change throughout the time evolution of a physical systems. These

quantities are then stated to be conserved under certain conditions which is governed by conservation laws. It can be shown that conservation laws are consequence of the symmetry properties of a physical system (invariance properties of a system under a group of transformations [4]). These symmetry properties of the system and conservation laws are connected with Noether's theorem, e.g. [4].

Noether's 1<sup>st</sup> theorem deals with global symmetries and conservation laws stating that for every continuous global symmetry there is a conservation law. Note that continuous local symmetries depend on arbitrary functions of the spacetime coordinates [8].

Important consequences of Noether's 1<sup>st</sup> theorem are evident in classical mechanics, i.e spatial translation corresponds to linear momentum, spatial rotation to angular momentum and time translation to energy conservation, respectively. In electromagnetics, on the other hand an important consequence is the correspondence between gauge symmetry and electric charge conservation. Mathematically, one obtains the link between the symmetry and the continuity equation for charge conservation provided the equation of motions are satisfied.

This paper deals with a philosophical view associated with relationship of mathematics and physics within a framework given by Noether's theorem.

The paper is organized, as follows; First the least action principle is reviewed and illustrated on the laws of reflection and refraction of light rays. This is followed by short mathematical representation of correlation of time symmetry and energy conservation. Next section outlines the notion of symmetry in mathematics and physics. In section 5 philosophical implications of Noether's theorem are addressed. Finally, some concluding remarks are given.

## 2 Least action principle

The mathematical base for Noether's theorem is calculus of variations, i.e. mathematical structures called functionals and notions of extremals and invariances related to functionals [4]. While functions represents a mapping from set of real numbers to real numbers, functionals are mapping from set of certain functions to the set of real numbers. Moreover, utilizing the extremals and invariances of functionals results in Noether's theorem. Many real-world problems arising in science and technology can be solved only by the use of numerical methods which dominantly stem from variational methods.

In classical mechanics, and generally in many areas of classical physics, one may use equations of motion in a Newtonian sense to predict the evolution of the systems provided some initial conditions and boundary conditions at the present moment are known. Alternatively one may specify starting and final position, or initial and final time instant and seek for the trajectory satisfying the minimum energy, or minimum time request. The solution, i.e. the obtained trajectory, minimizes the difference between the kinetic and potential energy of the system integrated over time. This is the well-known the *least action principle*. Note that time integral of the difference between kinetic energy and potential energy is called *action*.

Historically, the least action principle comes from Maupertuis and Fermat [9]. In subsections to follow the least action principle is illustrated on the phenomena of light reflection and refraction, respectively.

When considering light ray propagation, it appears that among all possible paths between the initial instant  $t_1$  and final instant  $t_2$  light ray follows the path that takes the least time to travel from  $t_1$  to  $t_2$ . Fig 1. shows the reflection of light ray, while Fig.2. depicts the refraction case.

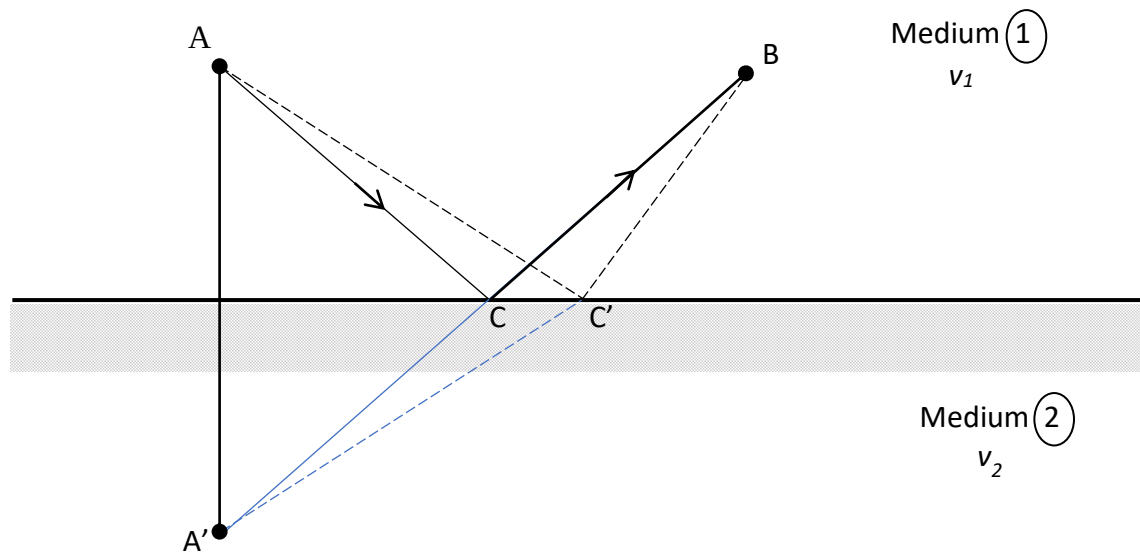


Figure 1: Reflection of the light ray

Observing Fig 1 it is obvious, in a geometrical sense, that the shortest, and at the same time the fastest, path is the one having the same angle of incidence and reflection (path ACB). Any other path (A'CB) is necessarily longer.

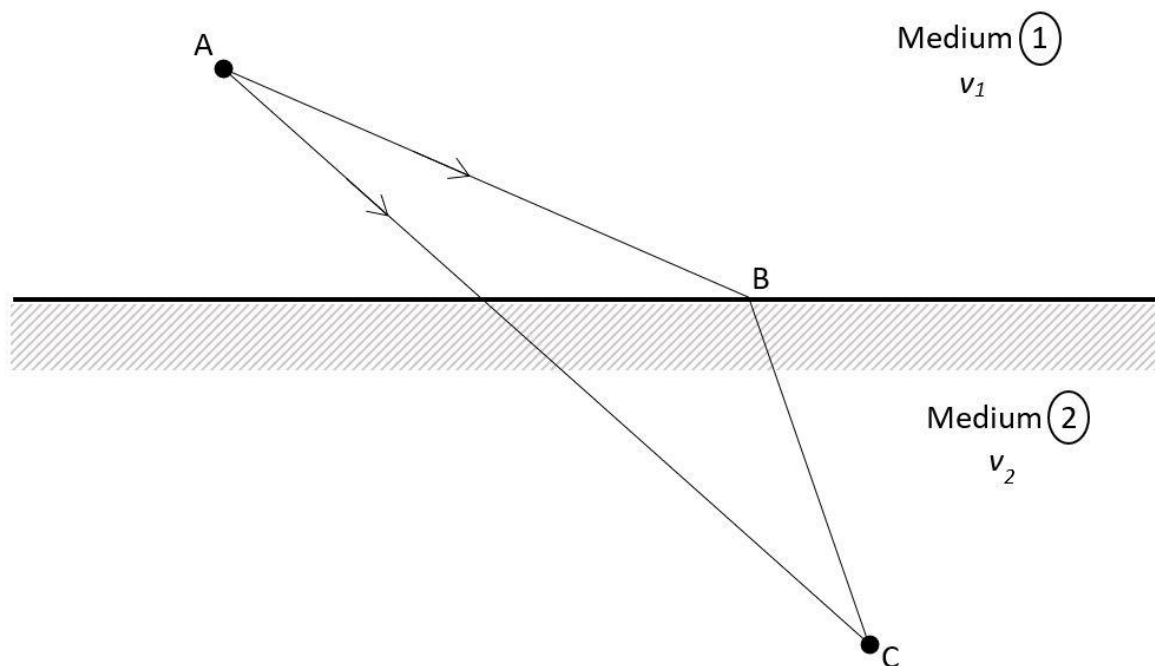


Figure 2: Refraction of the light ray

For the case of light ray refraction, Fig. 2, it can be shown that, due to different velocities of light in different media, the shortest path is not the fastest.

The law for the reflection and refraction of light ray, respectively, is derived in subsections to follow.

## 2.1 Law of light reflection

From the well-known expression

$$dt = \frac{ds}{v} \quad (1),$$

where  $dt$  and  $ds$  stands from infinitesimal time interval and infinitesimal distance segment, respectively,  $v$  is light propagation velocity in an arbitrary medium and by Introducing refraction index  $n$  as a ratio of light propagation velocity in free space  $c$  and a material medium

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

the corresponding functional can be written as

$$t = \frac{1}{c} \int_{s_1}^{s_2} n(x, y) ds \quad (3)$$

The problem can be now treated in rectangular coordinates, as shown in Fig 3.

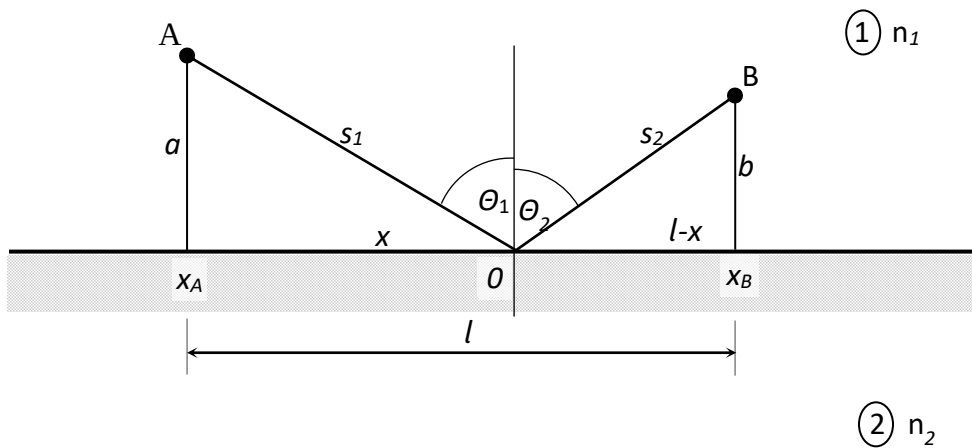


Figure 3: Reflection of the light ray in rectangular coordinates

Note that  $s_1+s_2$  is the total distance travelled by light ray from point  $A$  to point  $B$ , while  $\theta_1$  and  $\theta_2$  stands for incidence and reflection angle, respectively.  
Furthermore, in rectangular coordinates it follows

$$t = \int_{x_A}^{x_B} \frac{1}{c} n(x, y) \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (4)$$

Now, the functional (4) is required to be minimal

$$t = \int_{x_A}^{x_B} \frac{1}{c} n(x, y) \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \min \quad (5)$$

According to Fig. 3 one has

$$t = \int_{x_A}^0 \frac{1}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{x_A}\right)^2} dx + \int_0^{x_B} \frac{1}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{x_B}\right)^2} dx \quad (6)$$

and performing straightforward integration yields

$$t = \frac{1}{c} \left( \sqrt{x_A^2 + a^2} + \sqrt{x_B^2 + b^2} \right) \quad (7)$$

Again, from Fig. 3 it can be written

$$t = \frac{1}{c} \left( \sqrt{x^2 + a^2} + \sqrt{(l-x)^2 + b^2} \right) \quad (8)$$

Finally, to minimize the time required for light ray to travel from  $A$  to  $B$  the following condition is to be satisfied

$$\frac{\delta t}{\delta x} = 0 \quad (9)$$

and one obtains

$$\frac{x}{c\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{l-x}{c\sqrt{(l-x)^2 + b^2}} = 0 \quad (10)$$

or

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{l-x}{c\sqrt{(l-x)^2 + b^2}} \quad (11)$$

which, according to Fig 3 yields simple condition

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (12)$$

stating that incident angle and angle of reflection are the same

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (13)$$

This is the well-known law of reflection of light.

## 2.2 Law of light refraction

The problem of light refraction analyzed in rectangular coordinates is depicted in Fig.4.

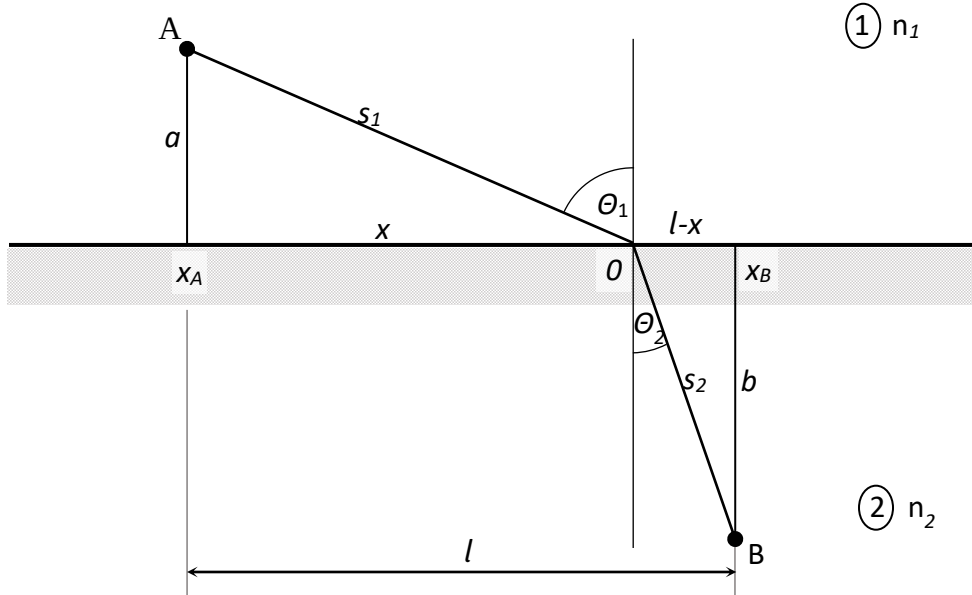


Figure 4: Refraction of the light ray in rectangular coordinates

Again  $s_1 + s_2$  is the total distance travelled by light ray from point A to point B, while  $\theta_1$  and  $\theta_2$  stands for incidence and refraction angle, respectively. Note that  $n_1$  and  $n_2$  denote refraction indices of different media.

Starting from the request of minimum time expressed by functional (5) it can be written

$$t = \int_{x_A}^0 \frac{n_1}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{x_A}\right)^2} dx + \int_0^{x_B} \frac{n_2}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{x_B}\right)^2} dx \quad (14)$$

From Fig. 4 it follows

$$t = \frac{1}{c} \left( n_1 \sqrt{x^2 + a^2} + n_2 \sqrt{(l-x)^2 + b^2} \right) \quad (15)$$

and the request to minimize the time necessary for a light ray traveling from A to B (9) yields

$$\frac{n_1 x}{c\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{n_2 (l-x)}{c\sqrt{(l-x)^2 + b^2}} = 0 \quad (16)$$

or

$$\frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{n_2 (l-x)}{\sqrt{(l-x)^2 + b^2}} \quad (17)$$

which, according to Fig. 4 yields

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (18)$$

This is well-known Snell's law of refraction of light in two media with different properties

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (19)$$

Therefore, Fermat principle of the least action provides the derivation of laws of reflection and refraction of light ray.

### 3 Time symmetry and conservation of energy

According to Noether's theorem the consequence of time symmetry is the conservation of energy which can be readily demonstrated by using Lagrangian and Hamiltonian formalism in classical mechanics. This section deals with one-dimensional case pertaining to the study of single particle behaviour.

Consider action  $F$

$$F = \int_{t_1}^{t_2} L dt \quad (20)$$

where Lagrangian  $L$  represents the difference between kinetic and potential energy, respectively, of a particle.

In simple one-dimensional case for a particle of mass  $m$ , the Lagrangian  $L$  is given by

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - W_{pot}(x) \quad (21)$$

where

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad (22)$$

and  $x$  stands for position of particle, while  $W_{pot}(x)$  denotes the potential energy of the system.



It is worth noting that Lagrangian (21) is explicitly time independent though it is implicitly time dependent as position is a function of time  $x=x(t)$ .  
Now varying action (20)

$$\delta F = 0 \quad (23)$$

one obtains [6]

$$\delta F = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \right] \delta x dt + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \delta x \Big|_{t_1}^{t_2} = 0 \quad (24)$$

Furthermore, as variation  $\delta x$  vanishes at initial and final time instant, respectively, it follows

$$\frac{\delta F}{\delta x} = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \right] dt = 0 \quad (25)$$

and the Euler-Lagrange equation of motion is

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = 0 \quad (26)$$

Inserting (21) into (26) Newton's 2<sup>nd</sup> law is readily obtained

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\nabla W_{pot}(x) \quad (27)$$

where the force on the particle is given by

$$\vec{F} = -\nabla W_{pot}(x) \quad (28)$$

Therefore, the particle trajectory minimizing the action (20) is the one satisfying the Newton equation of motion (27).

The Hamiltonian of the system represents the total energy of the system and can be written as

$$H = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + W_{pot}(x) \quad (29)$$

Also, the Newton 2<sup>nd</sup> law (27) which can be written as

$$\vec{F} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \vec{e}_x \quad (30)$$

which, in Hamiltonian notation, can be represented by means of following set of equations:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (31)$$

$$\frac{dx}{dt} = + \frac{\partial H}{\partial p} \quad (32)$$

where  $p$  is linear momentum

$$p = m\dot{x} \quad (33)$$

As from (21) one has

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \dot{x} = m\dot{x} \quad (34)$$

the relationship between Hamiltonian and Lagrangian is

$$H = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \dot{x} - L \quad (35)$$

Finally, for a system with a time translation symmetry

$$t \rightarrow t' = t + \delta t \quad (36)$$

the Hamiltonian of the system remains invariant.

It is relatively easy to prove that the Hamiltonian is a conserved quantity under a time translation which is outlined below.

By differentiating (35) with respect to time it follows

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \dot{x} - L \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \dot{x} \right) - \frac{dL}{dt} \quad (37)$$

Now, one has:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \dot{x} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \ddot{x}} \ddot{x} \quad (38)$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \frac{d\dot{x}}{dt} + \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial L}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \ddot{x} + \frac{\partial L}{\partial t} \quad (39)$$

while inserting (38) and (39) into (37) yields

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \ddot{x} - \left( \frac{\partial L}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \ddot{x} + \frac{\partial L}{\partial t} \right) \quad (40)$$

and one obtains

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \dot{x} - \frac{\partial L}{\partial x} \dot{x} - \frac{\partial L}{\partial t} \quad (41)$$

which can also be written:

$$\frac{dH}{dt} = \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} \right) \dot{x} - \frac{\partial L}{\partial t} \quad (42)$$

Now, as it is well-known [4], Euler Lagrange equation vanishes

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (43)$$

and expression (42) becomes

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{\partial L}{\partial t} \quad (44)$$

It turns out that time derivative of Lagrangian (21) is zero, as there is no explicit time dependence.

Therefore, it follows that the total time derivative of the Hamiltonian is also zero

$$\frac{dH}{dt} = 0 \quad (45)$$

leading to conclusion that Hamiltonian (total energy of the system) is conserved under the time translation (36).

To sum up; provided the Lagrangian is time invariant the Hamiltonian (total energy of the system) is conserved which represents *the energy conservation law*. In other words, energy is conserved if the physical laws do not change with time, i.e. the *action* is invariant under a translation in time.

#### 4 A note on symmetries

In a mathematical sense symmetry can be considered as self-similarity of an object, while from the physical point of view symmetry implies invariance or processes that do not change under some circumstances.

Straightforward example of symmetry (in geometrical sense) is the rotation of some geometrical objects, such as square, or circle. Thus, square appears to be the same when rotated for angle of 90°, or it can be stated that square remains unchanged upon such transformations. Circle, on the other hand, is infinitely symmetrical as it always looks the same, no matter how it is rotated.

So, being symmetrical is a request that object appears to be the same when subjected to some transformations.

Gauge symmetries generally represent a change of some parameters of a system which does not influence a system, i.e. does not change the physical laws.

Global symmetries pertain to transformations influencing all points in space-time in a same manner. An example of such a symmetry would be a translation by a certain distance along an arbitrary axis of co-ordinate system, or a rotation by an arbitrary angle around the origin of co-ordinate system, as each event in space-time would be influenced in the same way.

Therefore, provided a system is invariant under such a transformation one deals with a global symmetry. Global symmetries are associated with conservation laws via Noether's theorem, i.e. invariance under time translation yields the conservation of energy, invariance under space translation yields linear momentum conservation, while invariance under rotation results in the angular momentum conservation. These invariances imply following symmetries: homogeneity of time and space plus isotropy of space.

The most convenient tool for mathematical representation and analysis of symmetries is the group theory [10]. For example, a group  $G$  representing a collection of elements with multiplication laws has the following properties: closure, associative, identity and inverse.

Note that local symmetry is associated with electromagnetic theory.

Thus, for source-free Maxwell equations:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (46)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (47)$$

scalar function  $\varphi$  and vector function  $\vec{A}$  are introduced to solve (46) and (47), i.e. one deals with following expressions:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (48)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (49)$$

The gauge transformations:

$$\varphi \rightarrow \varphi - \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \quad (50)$$

$$\vec{A} \rightarrow \vec{A} + \nabla \Lambda \quad (51)$$

where  $\Lambda$  is arbitrary scalar function, result in the same electric and magnetic field, respectively.

In other words, electric and magnetic field are gauge invariant. By invariant it is assumed that numerical value of a quantity of interest is not changed by a coordinate transformation.

Conservation of electric charge emerges from this local symmetry (gauge invariance) [5].

Therefore, physical laws, being gauge invariant, inevitably represented by means of gauge fields which are not measurable and, consequently, do not have physical meaning. Nevertheless, gauge fields, being auxiliary functions, are necessary to be defined within classical electromagnetics as, for example Lorentz force can be obtained from the corresponding Lagrangian only if the magnetic vector potential vector  $\vec{A}$  is introduced. Namely, Lorentz force cannot be derived from Maxwell's equations for non-moving media.

## 5 Some philosophical implications

Noether's theorem associates symmetries with conserved quantities, i.e. symmetries and conservation laws are linked up featuring the use of a minimum principle in nature - the principle of least action [4].

The least action principle and the fastest (not the shortest) path of a light ray are often related with Maupertuis attitudes and Leibniz philosophy pertaining to the best of all possible worlds. Maupertuis, as Leibniz, saw in the least action principle touch of God and sign of the best of all possible worlds [9].

It is worth mentioning that Voltaire strongly ridiculed this view in his famous novel "Candid" which was a great success and somehow wiped out Maupertuis and Leibniz views. Note that Maupertuis and Leibniz are mentioned in some of Kant's writings.

Somehow, pure mathematical entities, in this case symmetry properties influence the laws governing physical world, i.e. objective reality. The question is whether one may conclude that in this case mathematics represents ontology, as a study of the inner nature of phenomena, while physics deals with epistemology, a study of knowledge one may obtain about the phenomena. These ontic-epistemic relations could be found in Kant philosophy pertaining to things in themselves (noumena) and their manifestations, or empirical appearances (phenomena) correspondence between platonic world of ideas and non-perfect world of physical objects, Leibniz philosophy pertaining to best of all possible worlds, or even in Copenhagen representation of quantum physics.

According to Noether's 1<sup>st</sup> theorem every continuous symmetry corresponds to a certain conservation law.

Therefore, as discussed elsewhere, e.g. in [11], the question is whether Noether's theorem provide a link between ontic and epistemic aspects of a system under consideration.

In a physical sense one may state that energy represents a property of an object, or system that is conserved under time translation. By conserved it is understood that a quantity being considered is not altered throughout some process.

Thus, space invariance corresponds to the conservation of linear momentum, rotation invariance corresponds to the conservation of angular momentum. In particular, gauge symmetry yields the charge conservation [3].

Mathematically speaking Euler Lagrange equations of motion obtained by means of Hamilton principle are unaffected by the addition of a divergence term to the Lagrangian.

Historically speaking, the developers of the principle of the least action did not have a unified attitude towards the corresponding underlying principle. While Fermat claims that Nature follows the path that requires the shortest time, Lagrange refutes any metaphysical meaning of least action principle.

Anyway, Noether's theorem addresses what remains unchanged, i.e. what quantity is conserved under a time translation.

Though Noether's theorem shows the correspondence between continuous time translation and the law of energy conservation this correspondence is not only a mathematical description derived in dependence of physical data. In the contemporary philosophy of mathematics there are two theoretical approaches that assert a kind of independence of mathematics in relation to the world of physical experience: The Platonist theory and the Theory of innateness of mathematical structures [12]. The roots of modern Platonist theory leads to Plato's assertion that the ontological basis of the physical world is geometric figures – imperfect and spatially divisible perfect and time invariant. The roots of the theory of innateness of mathematical structures lead to Kant's philosophy stating that mathematics ontologically belongs to the *a priori* domain of research. The common point in the ontological aspects of these theories is the assertion of the autonomous independence of mathematics. On the other hand, in

epistemological aspects, these two theories are mutually irreconcilably exclusive in a logical sense.

The Platonist oriented philosophy of mathematics claims that by dealing purely with mathematics one discovers the inner principles of the structure of the world of physical experience. Platonistically interpreted Noether's theorems suggest that the law of energy conservation arising from mathematical symmetries corresponds to ontological and epistemological identity, respectively.

The theory of innateness of mathematical structures provides a different connection between mathematical objects and the world of physical experience. Furthermore, the correspondence understood in this way, in terms of Kant's philosophy, leads to the philosophy of Thomas Aquinas – *adaequatio intellectus et rei*. Dealing with pure mathematics, a part of the rational structure of the mind is discovered, while applying this mathematical structure in physics allows one to seek the true nature of the universe. Such an application of mathematics, on the other hand, is not only a description of a physical state of affairs from the pure mathematics. Applying mathematics to physics is one of the rational ways one investigates the truth and there is no ontological and epistemological identity. The question is whether mathematics/physics relationship points out to some deeper principles. According to Kant's philosophy there are two possibilities: the discovery of some deeper principles of the sensibly accessible world of phenomenality is only a matter of the development of science, or their discovery is noumenally beyond the possibility of the cognitive powers of the mind. In Kant's philosophy, the phenomenon is a doubly caused image. In a sense of the subject-object relationship; subjectively caused by the apperceptive intuition (*Anschauung*) of space and time, and objectively caused by an unknowable thing in itself (*Ding an Sich*).

## 6 Who was Amalie Emmy Noether?

Amalie Emmy Noether, Figure 5, a great scientist who made crucial contributions in abstract algebra and mathematical physics, was born in Erlangen, Germany on 23 March, 1882. Despite numerous obstacles she had experienced as women in academia in those times, she completed her PhD in mathematics, *summa cum laude*, in 1907 at the *University of Göttingen*.



Figure 5: Amalie Emmy Noether

Having completed her thesis she collaborated with many prominent mathematicians of that period, such as, David Hilbert, or Hermann Minkovski. Note that women had been allowed into universities in France in 1861, England in 1878, and Italy in 1885, but it was rather high resistance to women presence at universities in Germany at the turn on the century.

David Hilbert and Felix Klein invited Emmy to give some courses at the *University of Göttingen*, but under Hilbert's name, as at that time women were not allowed to hold official positions. Hilbert and Einstein were deeply frustrated by such a mistreatment of Emmy Noether.

*Gentlemen, I do not see that the sex of the candidate is an argument against her admission as a Privatdozent. After all, the faculty senate is not a bathhouse.*

*David Hilbert*

*On receiving the new work from Fraulein Noether, I again find it a great injustice that she cannot lecture officially. I would be very much in favour of taking energetic steps in the Ministry to overturn this rule.*

*Albert Einstein*

Eventually, University allowed Emmy to give lectures by using her name in 1919 after an oral examination carried out by the faculty members. Finally, in 1922 she was appointed as *unofficial associate professor*, which was a purely honorary position. In other words, Emmy lectured for free.

*Emmy Noether was one of the most influential mathematicians of the century. The development of abstract algebra, which is one of the most distinctive innovations of twentieth century mathematics, is largely due to her — in published papers, in lectures, and in personal influence on her contemporaries.*

*Nathan Jacobson*

She gave a proof for her celebrated theorem, mentioned in this paper, in 1915, while it was published 3 years later in 1918.

She was a visiting professor in Moscow in 1928-29 and Frankfurt in 1930. She accepted an offer for a visiting professorship at Bryn Mawr College, Pennsylvania, United States in 1934, and also lectured at the Institute of Advanced Study in Princeton, New Jersey.

*When I was called permanently to Gottingen in 1930, I earnestly tried to obtain from the Ministerium a better position for her, because I was ashamed to occupy such a preferred position beside her whom I knew to be my superior as a mathematician in many respects.*

*Hermann Weyl*

Amalie Emmy Noether died on 14 April 1935 in Bryn Mawr, Pennsylvania, United States, at the age of 53.

Emmy's theorem provides a central principle in physics connecting two fundamental concepts in physics; symmetry and conservation, but, finally, the real importance of Emmy's contributions was fully recognised by the end of 20<sup>th</sup> century.

Her achievements in mathematics and physics are of great importance, but she also plays an important role as a women in science in the 1<sup>st</sup> half of 20<sup>th</sup> century. Namely, together with some other great female scientists such as Mariee Sklodovska-Curie or Lise Meitner, she changed the paradigm of that time that science was a male-dominated activity.

More than a century later, mathematicians and physicists are still studying and citing her paper from 1918 article and developing her concepts.

## 7 Conclusions

The paper deals with some physical and philosophical aspects of Noether's theorem. According to Noether's theorem every continuous symmetry in action yields conserved quantity.

It turns out that the the energy is conserved under time translation, linear momentum is conserved if the *action* is invariant under a translation in space. If there is rotational invariance of the *action*, the angular momentum is conserved, i.e. the physical laws are the same regardless of the direction. Finally, the conservation of electric charge is a consequence of gauge symmetry.

Therefore, to state that physical laws have a certain symmetry actually means that the *action* is invariant under the transformation associated with that symmetry.

From the philosophical point of view, a deeper correlation of mathematics and physics has been addressed featuring certain epistemic and ontic aspects, as fundamental laws of nature are represented by the equations with incorporated inherent symmetry.

In a sense, Noether's theorem relates conservations laws to symmetries of space, time and internal variables thus giving a rise to deeper principles.

## 8 References

- [1] E. Wigner, The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural sciences, *Communications in Pure and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. I, Feb. 1960.
- [2] S. Bangu, On 'The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences' in E. Ippoliti et al. (eds.), *Models and Inferences in Science*, Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics 25, Springer, 2016.
- [3] T.B. Mieling, Noether's Theorem Applied to Classical Electrodynamics, Lecture notes, Nov. 2017.
- [4] D.E. Neuenschwander, *Emmy Noether's Wonderful Theorem*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 2011.
- [5] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics Part I: Derivation of Continuity Equation and Lorentz Force. // 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Croatia, Sept. 2022.
- [6] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics: Part II: Derivation of Maxwell's Equations. // 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) Split, Croatia, Sept. 2022.
- [7] D. Poljak, Review of Least Action Principle in Electromagnetics: Part III: Applications. // 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) Split, Croatia, 2022.
- [8] A. Zee, *Fearful Symmetry. The Search for Beauty in Modern Physics* by A. Zee, Princetown University Press, 2007.
- [9] I. Ekeland, *The Best of All Possible Worlds*, University of Chicago Press, Chicago, USA 2007.
- [10] M. Petitjean, Global Symmetries, Local Symmetries and Groupoids, *Symmetry*, 13, 2021.
- [11] S. Iyengar, On On Philosophy of Science and Noether's Chefd'oeuvre, *Asia Pacific Mathematics Newsletter*, Vol. 4, No, July 2014.



[12] Ø. Linnebo, Philosophy of Mathematics, Princeton University Press, New Jersey, 2017.

## **FILOZOFSKE IMPLIKACIJE TEOREMA EMMY NOETHER – POVEZNICA SIMETRIJA I ZAKONA SAČUVANJA**

Dragan Poljak, Mirko Jakić, Sveučilište u Splitu

### Sažetak:

Postoje fizikalne veličine koje ostaju konstantne za vrijeme evolucije fizikalnog sustava. Ove veličine ostaju sačuvane pod određenim uvjetima koje diktiraju zakoni sačuvanja. Nadalje, može se pokazati da su zakoni sačuvanja posljedica svojstava simetrije fizikalnog sustava, tj. (svojstva invarijantnosti sustava). Ova svojstva simetrije sustava i s tim u vezi zakoni sačuvanja proizlaze iz teorema Emmy Noether.

Općenito, kad funkcional u varijacijskom računu, odnosno integral djelovanja poprima ekstremnu vrijednost, iz [teorema Emmy Noether](#) proizlazi zakon sačuvanja. Tako onda invarijantnost sustava pod vremenskom translacijom vodi na sačuvanje energije, invarijantnost prostorne translacije odgovara sačuvanju linearnog momenta, rotacijska invarijantnost odgovara sačuvanju angularnog momenta, dok baždarna invarijantnost vodi na sačuvanje električnog naboja.

S filozofske točke gledišta, radi se o pravcu unifikacije matematike i fizike, čak i poveznice epistemologijskih i ontologijskih aspekata, s obzirom da su fundamentalni zakoni prirode opisani jednadžbama koje sadrže prekrasnu inherentnu simetriju. U ovom radu razmatraju se filozofske i fizikalne implikacije teorema Emmy Noether.

Keywords: Theorem Emmy Noether, simetrije, zakoni sačuvanja, filozofski aspekti



*Darko Fischer*  
FERIT, Osijek  
[dfischer1938@gmail.com](mailto:dfischer1938@gmail.com)

## POVIJEST ODREĐIVANJA VRIJEDNOSTI BROJA $\pi$

**Sažetak:** Omjer opsega i promjera kruga, broj najčešće označavan simbolom „ $\pi$ “ bio je stoljećima interesantan matematičarima. Rad prikazuje načine određivanja broja  $\pi$  od antičkih grčkih matematičara do današnjih dana. Na računalu je simuliran način na koji je Ludolph van Ceulen izračunao taj broj. Iz prikaza broja  $\pi$  na 1000 dekadskih znamenaka napravljen je histogram znamenaka u prikazu tog broja u oktalnom, dekadskom i heksadekadskom brojevnom sustavu.

**Ključne riječi:** Opseg kruga, mnogokutnik, Arhimed, Ludolph van Ceulen, računalna simulacija, brojevni sustav

### Uvod

Već pred nekoliko tisuća godina su tadašnji znanstvenici, uglavnom filozofi, matematičari i astronomi uočili, da je omjer opsega i promjera kruga, broj neovisan o veličini kruga. U najranijim procjenama ustanovljeno je da je taj broj blizak broju tri. Smatra se, da biblijski zapis iz Prve knjige o kraljevima [1] navodi tu procjenu. Popis osoba i radova koji su se bavili brojem  $\pi$  vrlo je dugačak [2] i do razdoblja korištenja računala sadrži 35 značajnih zapisa počevši sa zapisom iz vremena starog Egipta. Popis radova iz razdoblja računala sadrži približno isto toliko radova u razdoblju od 1947. do današnjih dana, kada je Plouffe [3] objavio algoritam nalaženja  $n$ -te heksadekadske znamenke broja  $\pi$  bez računanja prethodnih znamenaka.

Također postoji veliki broj načina i formula za računanje broja  $\pi$ .

Prva prilično točna procjena broja  $\pi$  pripisuje se slavlrenom grčkom matematičaru Arhimedu. Potaknut Arhimedovom procjenom i načinom računanja upisanih i opisanih mnogokutnika, njemačko-holandski matematičar Ludolph van Ceulen izračunao je broj  $\pi$  na 35 dekadskih znamenaka. Kasnije su otkrivene mnogi načini računanja broja  $\pi$ . Korisnici danas mogu s razmjerno skromnom opremom bez većih napora računati broj  $\pi$  na nekoliko tisuća znamenaka, dok profesionalni informatičari i matematičari mogu dostići i točnost od 100 trilijuna znamenaka. U ovom radu prikazana su samo dva, vjerojatno najpoznatija računanja broja  $\pi$ , onaj Arhimedov iz trećeg stoljeća prije nove ere i rad Ludolpha van Ceulena iz 17. stoljeća. Na temelju tih proračuna prikazan je jednostavan način računanja broja  $\pi$  pomoću računala na 1000 znamenaka. Rezultati prikazani u tri poziciona brojeva sustava pokazuju da su znamenke ovog broja jednoliko raspoređene.

## 1. Arhimedov proračun

Grčki matematičar Arhimed (Sirakuza 287 pne - Sirakuza 212 pne) vjerojatno je prvi došao na pomisao da se iz opsega mnogokutnika upisanih i opisanih u krug može procijeniti opseg kruga. Opseg kruga mora biti veći od opsega upisanog mnogokutnika i manji od opsega opisanog mnogokutnika. [4]. Sačuvani zapisi pokazuju da je Arhimedova procjena za  $\pi$  bila

$$223/71 < \pi < 22/7 \quad (1)$$

Nije poznato kako je Arhimed došao do tog rezultata. Iz zapisa je, međutim, poznato [3] da je Arhimed računao broj  $\pi$  pomoću upisanih i opisanih mnogokutnika. Počevši sa šesterokutom, Arhimed je izračunao opsege upisanog i opisanog mnogokutnika od 96 stranica. No nije poznato kako je Arhimed to računao. Grčki matematičari nisu poznavali pozicioni brojni sustav niti realne brojeve.

Zato Arhimed nije mogao računati na način kako je to skoro 2000 godina kasnije provodio Ludolph van Ceulen u Leidenu jer je za to trebao poznavati računanje drugog korijena. Vjerojatno je Arhimed aproksimirao vrijednosti drugog korijena razlomcima. Na primjer, možda je našao da je

$$\sqrt{3} \approx \frac{97}{56} \quad (2)$$

jer je mogao provjeriti da je

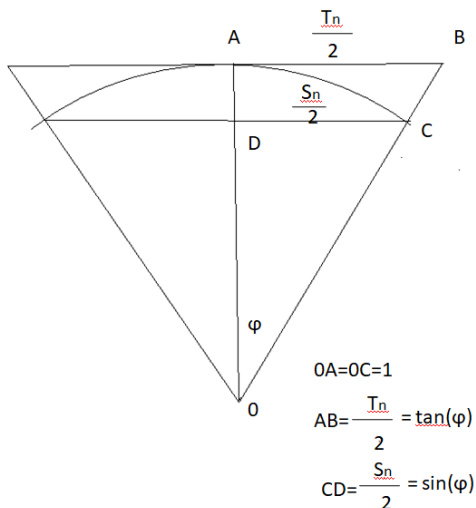
$$\frac{97 \cdot 97}{56 \cdot 56} \approx 3 \quad (3)$$

te je na analogan način našao drugi korijen ostalih brojeva u računanju dužine stranice pravilnog mnogokutnika od 96 stranica. Uzimajući danas poznatu vrijednost broja  $\pi$  na 10 znamenaka, Arhimedove relativne pogreške za donju i gornju vrijednost bile su samo 0.023% odnosno 0.040%.

Nije točno poznato koje međukorake u računanju stranica mnogokutnika je Arhimed provodio i kakvim se aproksimacijama služio kada je iracionalne brojeve aproksimirao razlomcima. Računalnom simulacijom mogućih Arhimedovih aproksimacija nismo uspjeli doći do rezultata (1) koji se pripisuje Arhimedu.

### 1.1 Trigonometrijski pristup

Neki autori [2] smatraju, da je Arhimed poznao osnovna svojstva trigonometrije, iako u njegovo vrijeme trigonometrijske funkcije nisu bile poznate i počeo ih je koristiti Ptolomej dva stoljeća kasnije. Ako je točna pretpostavka da je Arhimed poznao sinus i tangens funkcije, onda je prema Slici 1 u pravokutnim trokutima kojih ima  $2 \cdot n$  u  $n$ -terokutu upisanom i opisanom u krug polumjera 1, Arhimed mogao zaključiti da stranicu upisanog  $n$ -terokuta  $S_n$  i za stranicu upisanog  $2n$ -terkokuta  $S_{2n}$  vrijedi



Slika 1

$$\frac{S_n}{2} = \sin(\varphi) ; \quad \frac{S_{2n}}{2} = \sin(\varphi/2) \quad (4)$$

dok za opisane mnogokutnike vrijedi

$$\frac{T_n}{2} = \tan(\varphi) ; \quad \frac{T_{2n}}{2} = \tan(\varphi/2) \quad (5)$$

Iz poznate trigonometrijske relacije za sinus dvostrukog kuta dobiva se uz nešto preoblikovanja izraz za stranicu mnogokutnika od  $2n$  stranica kao funkcija stranice mnogokutnika od  $n$  stranica. Ta relacija glasi:

$$S_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{2 + \sqrt{4 - S_n^2}}} \quad (6)$$

Analogno iz relacije za tangens dvostrukog kuta dobiva se izraz po kojem se računa stranica opisanog  $2n$ -terokuta iz stranice  $n$ -terokuta. Dobiva se

$$\frac{2T_n}{\sqrt{4 + T_n^2} + 2} \quad (7)$$

Na temelju gornjih izraza i znajući da je stranica upisanog šesterokuta  $S_6=1$  i stranica opisanog šesterokuta  $T_6=2\sqrt{3}$ , Arhimed je s četiri iteracije mogao izračunati stranice upisanog i opisanog mnogokutnika od 96 stranica i iz njihovih opsega procijeniti vrijednost broja  $\pi$ .

## 1.2 Planimetrijski pristup

Druga je pretpostavka, da Arhimed nije koristio funkcije sinus i tangens jer za njih nije znao, već da je iz geometrijskih odnosa, opisanih ovdje u odjeljku 2 našao način računanja stranica mnogokutnika od  $2 \cdot n$  stranica iz

mnogokutnika od  $n$  stranica. Do tih relacija (izrazi (9) i (11)) može se doći poznavanjem samo Pitagorin poučak i izraz za površinu pravokutnog trokuta.

Bez obzira kojim se od dva navedena pristupa Arhimed služio, on je morao obavljati aproksimacije kada je računao drugi korijen i to prikazivao s razlomcima. Pri tome je morao voditi računa da kod računanja upisanih mnogokutnika zaokruživanja moraju biti prema manjim vrijednostima, a pri računanju opisanih mnogokutnika zaokruživanja moraju biti prema većim vrijednostima. Iako je Arhimed obavio samo četiri iteracije, on je morao provesti barem 24 zaokruživanja. Ne postoje zapisi, koja zaokruživanja je Arhimed proveo u svakoj od iteracija, pa je razumljivo da rekonstrukcija njegovog proračuna još nije pronađena.

700 godina nakon Arhimeda kineski astronom i matematičar Zu Chongzhi došao je jednakim ili sličnim postupkom ali s više iteracija do točnije vrijednosti. Računajući stranicu mnogokutnika od 24576 stranica došao je do vrijednosti od  $355/113$  što je relativna pogreška reda veličine  $10^{-8}$ .

## 2. Ludolphov algoritam

Ludolph van Ceulen (Hildersheim, Njemačka 28. 1. 1540 — Leiden, Nizozemska 31. 12. 1610) [5] bio je njemačko – holandski matematičar. Zbog pomanjkanja sredstava nije se mogao školovati već je bio samouki matematičar dok je za život zarađivao kao učitelj mačevanja.

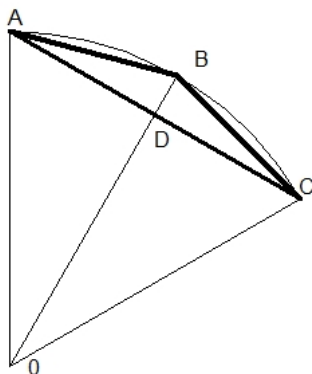
Ludolph je bio zanesen radovima Arhimeda te je čak 25 godina svog života posvetio računanju broja  $\pi$  i izračunao je 35 točnih znamenaka toga broja. Time se proslavio i broj  $\pi$  se njemu u čast naziva i Ludolphovim brojem. Na njegovom grobu u Leidenu uklesano je svih 35 znamenaka koje je on izračunao.

Za pretpostaviti je da Ludolph nije imao nikakva pomagala za računanje i da je sve radio ručno, pišući tintom i perom po papiru. Načelo njegovog računanja svodi se na računanje stranice pravilnog mnogokutnika od  $2n$  stranica i to iz stranice pravilnog mnogokutnika od  $n$  stranica. Iz izračunate stranice upisanog mnogokutnika doznaje se njegov opseg koji je manji od opsega kruga. Iz stranice opisanog mnogokutnika dobiva se opseg opisanog mnogokutnika koji mora biti veći od opsega kruga. Tako se dolazi do približne vrijednosti opsega kruga i broja  $\pi$  (koji je jednak opsegu podijeljenim s dva).

Računanje stranice  $2n$ -terokuta iz stranice  $n$ -terokuta možemo nazvati Ludolphovim algoritmom. Za pretpostaviti je da je na takav način računao i Arhimed jer za dobivanje izraza po kojima se provodi taj proračun dovoljno je poznavanje osnovne geometrije i Pitagorinog poučka. Dok je Arhimed

računao s razlomcima, za pretpostaviti je, da se Ludolph koristio dekadskim brojevnim sustavom i da mu je bila poznata metoda nalaženja drugog korijena iz broja. Kako je to bio dugotrajan posao, pogotovo ako se računalo ne veliki broj znamenaka, nije neočekivano, da je Ludolphu trebalo 25 godina da bi našao prvih 35 znamenaka broja  $\pi$ .

Kod računanja stranica upisanog mnogokutnika polazi se od prikaza na slici 2



Sl.:2 Upisani mnogokutnici u kružnici polumjera 1

Na Slici 2 je  $OA=OB=OC=1$  polumjer kruga u koji se upisuju mnogokutnici. AC je stranica upisanog mnogokutnika s n stranica. U izrazima koji slijede ta stranica mnogokutnika označena je simbolom  $S_n$ . Dužina  $AB=BC$  je stranica upisanog mnogokutnika od  $2n$  stranica. U izrazima koji slijede ta stranica mnogokutnika označena je simbolom  $S_{2n}$ . Zbog simetrije je  $AD=CD=AC/2$ . Površina trokuta OBC jednaka je  $CD/2$  što daje  $S_n/4$ . S druge strane, visina istokračnog trokuta OBC spuštена iz vrha O na stranicu BC je  $v = \sqrt{1-(S_{2n}/2)^2}$  a kako je osnovica tog trokuta jednaka  $S_{2n}$ , površina trokuta također je  $S_{2n} \cdot \sqrt{1-(S_{2n}/2)^2} / 2$ . Iz jednakosti površina dobiva se izraz

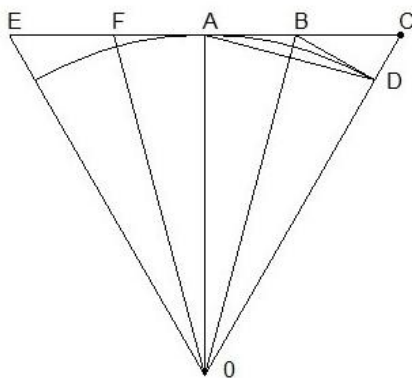
$$\frac{S_n}{4} = \frac{S_{2n} \sqrt{1 - \left(\frac{S_{2n}}{2}\right)^2}}{2} \quad (8)$$

Uređenjem ovog izraza dobiva se bikvadratna jednadžba po  $S_{2n}$  koja nakon prilagodbe za računanje daje izraz

$$S_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{2 + \sqrt{4 - S_n^2}}} \quad (9)$$

Iterativnim računanjem po izrazu (9) dobiva se stranica upisanog  $2n$  mnogokutnika a iz nje i opseg mnogokutnika. Kada  $n$  postaje dovoljno velik, taj opseg je blizak ali manji od opsega kruga, pa se tako dobiva broj koji je blizak ali manji od broja  $\pi$ .

Na sličan način računa se stranica opisanog mnogokutnika.



Sl. 3.: Opisani mnogokutnici u kružnicu polumjera 1

Na Slici 3  $OA=OD=1$  je polumjer kružnice oko koje se opisuju mnogokutnici.  $CE$  je stranica mnogokutnika od  $n$  stranica, ova dužina u formulama koje slijede označena je s  $T_n$ . Također je  $BF$  stranica mnogokutnika od  $2n$  stranica koje je u formulama koje slijede označena s  $T_{2n}$ . Zbog simetrije je  $AC=AE=CE/2 = T_n/2$  i  $AB=AF=T_{2n}/2$ . Površina pravokutnog trokuta  $OAC$  je  $1 \cdot AC/2 = T_n/4$ . Taj se trokut sastoji od tri trokuta:  $OAB$ ,  $0BD$  i  $BCD$ . Trokuti  $OAB$  i  $0BD$  su sukladni, dakle jednake površine. Ta površina iznosi  $T_{2n}/4$ . Površina pravokutnog trokuta  $BCD$  dobiva se kao polovica umnoška stranica  $BD$  i  $CD$ . Za stranicu  $BD$  vrijedi  $BD=T_{2n}/2$ . Za stranicu  $CD$  se dobiva  $CD=OC-1$ , dok je stranica  $OC$  hipotenuza trokuta  $OAC$  i iznosi  $1 + (T_n/2)^2$ . Kada se postavi jednakost površine jednog i zbroja triju trokuta dobiva se:



$$\frac{T_n}{4} = \frac{T_{2n}}{4} + \frac{T_{2n}}{4} + \frac{T_{2n}}{4} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{T_n}{2} \right)^2} - 1 \right) \quad (10)$$

što rješenjem po  $T_{2n}$  daje izraz

$$T_{2n} = \frac{2T_n}{\sqrt{4 + T_n^2} + 2} \quad (11)$$

Izrazi (9) i (11) su formule iz kojih se, poznavajući stranice upisanog i opisanog mnogokutnika od  $n$  stranica, računaju dužine stranica mnogokutnika s dvostruku više stranica. Pretpostavlja se da je Ludolph računao upravo na taj način.

Početno su poznate dužine upisanog i opisanog kvadrata ( $n=4$ ) koje iznose 2 i  $\sqrt{2}$ . Iterativnim postupkom dobivaju se dužine pa i opsezi upisanog i opisanog mnogokutnika. Za veliki broj iteracija ti opsezi su vrlo blizu opsega kruga te se tako procjenjuje vrijednost broja  $\pi$ . Ludolph je morao napraviti 58 iteracija da bi dobio  $\pi$  na 35 znamenaka.

Prema današnjem stanju računalne tehnologije, kako opreme tako i programske podrške, računanje s točnošću na veliki broj znamenaka je jednostavno. Dovoljno je iterativno u petlji koristiti izraze (9) i (11). Računanje broja  $\pi$  na 35 znamenaka, što je Ludolphu trebalo 25 godina, provodi se čak i na pametnom telefonu za djelić sekunde.

Opisanim Ludolphovim algoritmom i na danas lako dostupnoj računalnoj opremi ovdje smo izračunali 1000 znamenaka broja  $\pi$ . Osim dekadskog prikaza, napravljeni su i oktalni i heksadecimalni prikazi na 1000 znamenaka. Iz tih prikaza napravljen je histogram znamenaka koje se pojavljuju u tim prikazima. Rezultati su prikazani u Tablici 1. Kao što se moglo i očekivati i što je iz tablice vidljivo, u sva tri prikaza znamenke 0 do 7 u oktalnom prikazu, 0 do 9 u dekadskom i 0 do F u heksadekadskom prikazu su približno jednoliko raspodijeljene.

Tablica 1.: Histogram znamenaka broja  $\pi$  u prikazu od 1000 znamenaka u

oktalnom, dekadskom i heksadekadskom sustavu

| Zna-<br>menka | Okt-<br>alno | Dekads<br>ki | Heksa-<br>dekadski |
|---------------|--------------|--------------|--------------------|
| 0             | 111          | 93           | 58                 |
| 1             | 149          | 116          | 57                 |
| 2             | 110          | 103          | 54                 |
| 3             | 138          | 103          | 72                 |
| 4             | 106          | 93           | 61                 |
| 5             | 143          | 97           | 49                 |
| 6             | 121          | 94           | 67                 |
| 7             | 122          | 94           | 60                 |
| 8             |              | 101          | 72                 |
| 9             |              | 106          | 54                 |
| A             |              |              | 66                 |
| B             |              |              | 54                 |
| C             |              |              | 62                 |
| D             |              |              | 63                 |
| E             |              |              | 86                 |
| F             |              |              | 65                 |
| Ukup:         | 1000         | 1000         | 1000               |

## Zaključak

Povijest računanja broja  $\pi$  vrlo je opsežna pa smo se ovdje opširnije osvrnuli samo na dva najčešće spominjana dostignuća, onog Arhimedovog iz trećeg stoljeća prije nove ere i rada Ludolpha van Ceulena iz 17. stoljeća. Sve detalje Arhimedovog računanja, u kojima on nije koristio pozicioni brojevni sustav već samo racionalne brojeve, nismo uspjeli rekonstruirati. Ludolphov proračun simulirali smo na računalu. Iako je čak i za najpreciznije račune u svemirskim letovima dovoljno koristiti 16 znamenaka broja  $\pi$ , današnjim matematičarima i informatičarima je izazovno računanje Ludolphovog broja na ogroman broj decimala. Time pokazuju moć opreme kojom raspolažu. Prema dostupnim podacima [6] najviše znamenaka, njih oko 100 trilijuna izračunali su informatičari Googlea. Matematičari se i u današnje vrijeme bave načinima računanja broja  $\pi$  što pokazuje nedavno objavljeni radovi [3].

## Literatura

- [1] Biblija, Stvarnost Zagreb, 1969, Prva knjiga o kraljevima 7, 23
- [2][http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Pi\\_chronology](http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Pi_chronology); pristupljeno 26. 10. 2022.
- [3][http://en.wikipedia.org/wiki/Bailey–Borwein–Plouffe\\_formula](http://en.wikipedia.org/wiki/Bailey–Borwein–Plouffe_formula); pristupljeno 26. 10. 2022.
- [4] Pi history –MacTutor History of Mathematics (st-andrews.ac.uk) pristupljeno 7. 10. 2022
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ludolph\\_van\\_Ceulen](https://en.wikipedia.org/wiki/Ludolph_van_Ceulen), pristupljeno 7. 10. 2022
- [6][cloud.google.com/blog/products/compute/Calculating 100 trillion digits of pi on Google Cloud | Google Cloud Blog](https://cloud.google.com/blog/products/compute/Calculating_100_trillion_digits_of_pi_on_Google_Cloud); pristupljeno 26. 10. 2022.

**Summary:** The ratio of the circumference and diameter of a circle, the number most often denoted by the symbol " $\pi$ ", has been of interest to mathematicians for centuries. The paper shows the ways of determining the number  $\pi$  from ancient Greek mathematicians to the present day. The way Ludolph van Ceulen calculated that number was simulated on a computer. From the representation of the number  $\pi$  in 1000 decimal digits, a histogram of the digits in the representation of that number in the octal, decade and hexadecimal number systems was made.

**Keywords:** Circumference of a circle, polygon, Archimedes, Ludolph van Ceulen, Computer simulation, number system

*Darko Fischer*



*Franjo Jović*<sup>1</sup>  
FERIT Osijek  
fjovic90@gmail.com

## INFORMATIČKO NASLJEĐE BEČKOG FILOZOFSKOG KRUGA

**Sažetak:** Reakcija filozofa na izuzetan napredak fizike početkom 20. stoljeća: machista, klasičnih materijalista i Lenjina. Zastoj napretka znanosti izazvan gotovo istodobnim političkim neprilikama: ratom, revolucijom i nacizmom. Doprinos srednjoeuropske filozofsko-znanstvene misli današnjem tehnološkom stanju. Bečki filozofski krug Moritza Schliecka kao zagovornik realističnog izlaganja stvarnosti između dva rata. Položaj i angažman Rudolfa Carnapa u teoriji iskaza znanstvenog prikaza stvarnosti. Obrade podataka na Carnapovim principima, logičko-memorijske operacije i njihova filozofska trovalentna osnovica: ja – stvar – misao. Kriza i kraj aktivnost Bečkog filozofskog kruga. Potiskivanje dosega informatike i opće teorije sustava od strane mehanicista i vulgarnih materijalista nakon Drugog svjetskog rata. Politička stvarnost prema općoj teoriji sustava Ludwiga von Bertalanffyja. Tehnika prikaza stvarnosti Carnapa, posebno Carnapov koncept prostorno-ciljne informacije. Devijacije filozofije u društvu prožetom mehanicističkim pristupom informaciji. Kurt Andersena i kraj eksperata: nestvarnost današnje manipulativnosti informacijom. Model opće teorije sustava i teorija obreda kao organizmički filter stvarnosti. Prema sintetičkom jeziku opisa svijeta rizika zasnovanom na informatičkoj tehnologiji.

**Ključne riječi:** društveno-političke prilike 20. stoljeća, teorija tvorbe iskaza, Carnapova teorija informacije, dizajn za rizik, kvaziorganizmički sustav

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora

## Uvod

Napredak fizike početkom 20. stoljeća osobito dualizam val-materija i relativizam prostor-vrijeme dao je izuzetan poticaj društvu: stari mehanicistički svijet osjetilnog iskustva kao da se nepovratno urušio. Osobito istaknut pobornik promjena u sagledavanju stvarnosti na području fizikalno-kemijskih znanosti bio je pozitivist<sup>II</sup> Ernst Mach prethodnik tzv. Bečkog filozofskog kruga.

Reakciju društvenih znanosti nije trebalo dugo čekati. Prvi je izuzetno gnjevno reagirao 1908/09. godine još u egzilu u Švicarskoj V.I. Lenjin, jer se njegova političko-filozofska slika svijeta stubokom narušila [1]. Njegov je napad bio usmjeren primarno na Bogdanova, inače jednog od osnivača teorije sustava, koji je bio Lenjinov prethodnik na čelu komunista u carskoj Rusiji. Napad, iskazan u 400 stranica puna kritike filozofskih poimanja svijeta, bio je prigovor na potiskivanje materijalizma i na naglašavanje pozitivizma u filozofiji.

Prvi svjetski rat, Veliki rat, odgodio je veći odgovor ostalih oponenta a posve drugačija reakcija na napredak u poimanju svijeta nastala je nakon rata od tzv. Bečkog kruga.

*Bečki krug* bila je grupa znanstvenih teoretičara, matematičara i filozofa, koja se okupljala oko Moritza Schlicka, kome je dodijeljena profesorska katedra za 'Induktivnu znanstvenu filozofiju' 1922. pri bečkom sveučilištu [2]. Filozofski pravac koji je ova grupa razvila naziva se logički pozitivizam ili kasnije nazivan i logički empirizam. Članovi kruga, pored spomenutog Schlicka, bili su Rudolf Carnap, Otto Neurath, Friedrich Waismann, Philipp Frank, sestra i brat Olga Hahn-Neurath i Hans Hahn kao i Richard von Mises, Victor Kraft i Karl Menger. Od 1929. grupa se pojavljuje pod nazivom *Bečki krug*. No Moritz Schlick je 1936. ubijen od strane jednog svog, nacizmom zadojenog i/ili navodno poludjelog, studenta i tada se krug postupno raspada<sup>III</sup>.

Na *Bečki krug* djelovao je stariji pozitivizam, simbolička logika i logičko-semantička jezična analiza, čiji su predstavnici bili Ernst Mach, Henri Poincaré, Gottlob Frege, Bertrand Russell i Ludwig Wittgenstein. Manifest, *Die wissenschaftliche Weltauffassung des Wiener Kreises*, (hrv. *Znanstveno poimanje svijeta Bečkog kruga*) a kojeg su napisali Carnap, Neurath i Hahn izdan je 1930. Iste godine grupa počinje izdavati novine *Erkenntnis* (hrv. *Spoznaja*) s Carnapom kao urednikom.

*Logički empirizam* se smatra jednom od najutjecajnijih filozofskih škola koje su djelovale i odigrale važnu ulogu filozofske avangarde tijekom jednog desetljeća

<sup>II</sup> Pozitivizam je smjer u filozofiji i teoriji znanosti koji sve zasniva na činjenicama, a negira svaku metafiziku, te izbjegava objašnjenje i stvaranje hipoteza.

<sup>III</sup> Krug je djelovao do 1962. godine

između dva svjetska rata. Dvojica najznačajnijih studenata filozofa pri bečkom sveučilištu bili su Herbert Feigl i Kurt Gödel. Oni su se pojavljivali na sastancima kruga ali nisu bili članovi. Bečki krug su redovno posjećivali između ostalih: Hans Reichenbach, Carl Gustav Hempel, Alfred Tarski, Karl Popper i Willard Van Orman Quine.

Nacistička uništavanja kulture i znanosti teško su pogodila i logičko-analitičku filozofiju u Europi. Ubojstvo Schlicka bio je predznak nacističke vojno-političke oluje. Nekoliko najznačajnijih članova kruga bježi, nalazi utočište i razvija svoje ideje u Velikoj Britaniji i SAD-u [2]. Međutim, unutar kruga i prema vanjskim članovima vladao je određeni antagonizam koji se s godinama nije smanjivao [3].

## 1. Logički pozitivizam

Filozofski pravac logički pozitivizam, prvi su zastupali pripadnici Bečkog kruga. Kasniji naziv bio je i *logički empirizam*. Taj je pravac priznavao postojanje dviju osnovnih vrsta iskaza o predmetu, bitku i svijetu koje same po sebi ili kombinirano posjeduju značenje. Prva vrsta iskaza obuhvaća potrebne istine logike, matematike i svakodnevnog jezika. Druga vrsta obuhvaća empirijske prijedloge opisa svijeta oko nas, koje nisu nužne istine - umjesto toga, one su 'istinite s većom ili manjom vjerojatnošću'. Logički pozitivisti tvrdili su da je značenje nužno i bitno povezano s iskustvom u svijetu: samo iskustvom utvrđene činjenice je moguće spoznati (osim apriornih tvrdnji kao npr. u matematici i logici)<sup>IV</sup>. Oni su to zastupali s dubokim uvjerenjem da će studij filozofskih pitanja dati pozitivne rezultate ako budu rabljeni alati koje su davale formulacije matematičke logike [4].

Empirizam je naslijedio ideje britanskih empirista Johna Lockeja i Davida Humea preko Augusta Comtea sve do Ernsta Macha; logiku je preuzeo prvenstveno od Gottloba Fregea, Bertranda Russella, Rudolfa Carnapa i Ludwiga Wittgensteina, osobito djelom potonjeg filozofa *Tractatus logico-philosophicus*. Na taj način filozofija je trebala dati točne odgovore na logičko-formativnoj osnovici, kako su to već postigle prirodne znanosti i matematika.

Njihov zajednički prethodnik Immanuel Kant je moć rasuđivanja podijelio na analitičku, sintetičku, kao i na apriornu i aposteriornu. Prema Kantu mogla su postojati sintetička 'a priori rasuđivanja'. Primjer su matematičke tvrdnje. Frege je prihvatio Kantovu podjelu, ali je odbacio stav da postoje sintetička 'a priori rasuđivanja'. Prema Fregeu, matematika je logika, i njen učinak je da su matematičke tvrdnje a priori analitičke. Ostali logički pozitivisti prihvaćaju uglavnom Fregeove ideje u okvirima matematike i logicizma da je po njima rasuđivanje ili analitičko a priori ili sintetičko a posteriori. Nešto treće, sintetičko a priori, što se moglo naći kod Kanta, nije prihvaćeno. Da su Frege i Russell

<sup>IV</sup> Prešutna uvjerenja o svijetu, glavni alat antičke filozofije, empiristi ne spominju

pobrkali kvalitativno i kvantitativno pokazalo se tek kasnije u Russellovoj opetovanoj nemoći da objedini matematiku i logiku [5]. Tu je Lenjin bio u prednosti tumačenjem dvosmjernog dijalektičkog prijelaza kvantitete u kvalitetu<sup>V</sup>.

Dvije ideje iz Wittgensteinovog *Tractatus'a* utjelovljene su u logički pozitivizam: a) učenje da su sve smislene izjave istinite funkcije sastavljene od osnovnih tvrdnji i b) percepciju filozofije kao kritike jezika<sup>VI</sup>. Wittgensteinova teorija značenja razrađena je u princip verifikacije: jedna tvrdnja je smisljena onda i samo onda ako se može pokazati kao istinita ili lažna na temelju pojedinačnih opažanja, osim ako to već nije logička ili matematička istina. Ovaj kriterij, međutim, sadrži niz problema koji su sažeti u Carl Hempelovom djelu "*Problems and Changes in the Empiricists Criterion of Meaning*" (hrv. *Problemi i promjene u empiricističkom kriteriju značenja*) [6]. Na primjer, tvrdnja da su "svi labudovi bijeli" je problematična, jer da bi se pokazala istinitom moraju se ispitati svi postojeći labudovi. Drugi problem je taj što sam princip verifikacije nije ni analitički niti sintetički, i prema svojim kriterijima je besmislen.

Wittgensteinovu primarnu ideju o filozofiji kao kritici jezika, koju je on uglavnom preuzeo od Fregea, pozitivisti tumače „kroz filozofske jasne tvrdnje, koje znanost verificira“. U potonjem slučaju radi se o istinitosti tvrdnji a u prvom što tvrdnje zaista *znače*, što navodi Moritz Schlick u prvom broju časopisa bečkog kruga *Erkenntnis*. Akademski krug se tako mogao podijeliti na dio koji se bavio sintetičkim stvarima: na empiriste (prirodni znanstvenici, sociolozi, povjesničari, itd.), i na a prioriste (filozofe, logičare i matematičare). Zadatak ovih prvih bio je istražiti kako svijet izgleda, jer se to prema logičkim pozitivistima nije moglo ostvariti samo s a priori metodama.

## 2. Napuštanje ideje logičkog pozitivizma

Cvjetajući u nekoliko europskih centara tijekom 1930-ih, pokret je nastojao spriječiti zbrku ukorijenjenu u nejasnom jeziku i neprovjerljivim tvrdnjama pretvarajući filozofiju u "znanstvenu filozofiju", koja bi, prema logičnim pozitivistima, trebala dijeliti osnove i strukture empirijske znanosti, a najbolji primjer takve znanosti bila bi opća teorija relativnost Alberta Einsteina [7]. Unatoč svojoj ambiciji da preispita filozofiju proučavajući i oponašajući postojeće ponašanje empirijske znanosti, logički pozitivizam pogrešno je stereotipiziran kao pokret za regulaciju znanstvenog procesa i postavljanje strogih standarda na njega [7].

Nakon Drugog svjetskog rata pokret se prebacio na blažu varijantu, logični

<sup>V</sup> Primjer jednostavnog jednosmjernog prijelaza kvantitete u kvalitetu jest dodjela poretka natjecateljima u sportu

<sup>VI</sup> Tu je i glavni prigovor pozitivizmu kasnije ponavljan od Wittgensteina da se sva filozofija svodi na artizam riječi

empirizam, predvođen uglavnom Carlom Hempelom i ostalim 'pozitivistima', koji su se tijekom uspona nacizma uglavnom doselili u Sjedinjene Države. U narednim godinama vodeći su filozofi bili kritizirani u središnjim premisama pokreta od Willard van Orman Quinea i Karla Poppera, pa čak i unutar samog pokreta od Hempela. Do 1960. pokret se kretao svojom inercijom. No fokus akademske filozofije dramatično pomiče već 1962. godine objavljivanje knjige Thomasa Kuhna *Struktura znanstvenih revolucija*<sup>VII</sup>

Nekoliko čimbenika dovodi do "pada" logičkog pozitivizma. Jedan čimbenik bila je kritika unutar paradigme kakvu je Hempel provodio. U tipičnom analitičko-filozofskom duhu pokušavalo se bezuspješno desetljećima dobiti zadovoljavajući kriterij empirističke spoznaje svijeta i na kraju je bilo sve više onih koji su odustajali od te ideje.

Važnu ulogu u otklonu od pozitivizma odigrao je jedan drugi filozof koji je pripadalo logičkim pozitivistima: Willard van Orman Quine, najpoznatiji učenik Rudolfa Carnapa. Quine je tvrdio u svom poznatom eseju iz 1951. "Two Dogmas of Empiricism" (hrv. *Dvije dogme o empirizmu*), da se razlika između sintetičkih i analitičkih tvrdnji ne može jasno održati. Ovaj način razmišljanja stavlja ideju o logičkom pozitivizmu pred svršen čin: npr. stroga podjela na filozofe i ne-filozofe je neodrživa. Iz toga naravno slijedi da se smisao pozitivističkog kriterija ne može prihvatiti. Treći čimbenik otklona bio je sam Wittgenstein, koji je tijekom 1930-ih i 1940-ih razvio novu filozofiju koja je bila u protivnosti s njegovim *Tractatusom* i još više u protivnosti prema logičkom pozitivizmu.

### **3. Carnapova ideje jezičko-logičke izgradnje svijeta i mehanizama prostornosti svijeta**

Vrlo pojednostavljeno, Carnap je svaki stav, logički iskaz, uzimao kao početnu gradbenu istinu svog poimanja logičke izgradnje svijeta. Iskazi poput 'Ivan je visok' i 'Ksi barion ima masu od  $1\,314,86\text{ MeV}/c^2$ ' su empirički, dok je iskaz 'Kvadrat nad hipotenuzom jednak je zbroju kvadrata nad obje katete' analitički. Osnovna pretpostavka prema Wittgensteinu jest da su osnovne tvrdnje na kojima počiva neki sustav istinite.

Carnap je definirao logičke operacije nad istinitim iskazima, logistiku ulančenja operacija i dizajnirao tvorbeni sustav opisa svijeta [8]. Tako su se logičke operacije nad stavovima mogle mehanizirati i ovako pretvorene u računarske kombinacijske sheme slobodno razmnožiti. Temeljno je pitanje je li to što se tako dobilo i dalje istinito<sup>VIII</sup>.

<sup>VII</sup> Thomas Kuhn, *Struktura znanstvenih revolucija*, Jesenski i Turk, Zagreb, 2015

<sup>VIII</sup> Ovime se stavljaju u sumnju istinitosti i sve računalom izvedene logičke operacije



### 3.1 Carnapov dizajn tvorbenog sustava

Dizajn tvorbenog sustava (njem. *Konstitutionssystem*) služi Carnapu kao primjer ilustracije objašnjenja njegove teorije tvorbe. Po njemu postoje tri razine iskaza izgradnje svijeta: osobno-psihički predmeti, fizički predmeti i strano-fizički odnosno duhovni predmeti [8].

*Osobno-psihički objekti* tvore se i izvode na osnovi bazičnih relacija sličnosti (prisjećanja sličnosti). Konstitucija se izvodi na sličnostima zasnovanim na: elementarnim doživljajima, djelomičnoj sličnosti, krugu sličnosti, klasi kvalitete, jednakosti dijelova, sličnosti kvaliteta, klasama prostorne orijentacije, pronalascima u istraživanju, razlaganjem doživjeloga na osobne i skupne dijelove, ispravnih postavki vidnog polja, na poretku i značenje boja te na vremenskoj orijentaciji [8].

*Fizički objekti* tvore se iz trodimenzionalnog prostora koji se tvori opet uglavnom iz dvodimenzionalnog slikovnog dojma prateći vremenske a nama upotrebljive promjene. Među njima je nama najvažniji objekt naše tijelo sa svojim posebnostima. S pomoću tijela možemo ostvariti i ostala stvarima orijentirana osjetila. Doživljeno se tada može kvalitativno razraditi na područja koja su smisljena u svojim pojedinačnim sastavnicama-komponentama. Postupci njihovog osvještavanja se provode preko podsvjesnog u cjelinu nazvanu sebstvo. Iz osjetilnog svijeta 'točaka svijeta' stvara se osjećaj postojanja 'stvarnih stvari' pripisivanjem kvaliteta ostalim osjećajima. Ovo pripisivanje se nadopunjuje s pomoću određenih pravila analogija koje odgovaraju kategorijama supstancije i posljedičnosti. Svijet stvarnosti se suprotstavlja 'stvari fizičkog svijeta' kada se pojedinim 'točkama svijeta' pridjeljuju brojevi iznosi a ne samo kvalitativni odnosi. Fizički svijet ima prednost pred stvarnosnim osjećajem svijeta, jer je na . potpuno razumljiv način *svodiv na međuosobnu razinu* (tj. postaje njem. *intersubjektivierbar*) i zato što u njemu vrijede matematički obuhvativi zakoni [8].

Inopsihički i duhovni objekti se tvore preuređenjem vlastitog psihičkog tako da se tijelu druge osobe pridijele *obilježna svojstva izričaja* (njem. *Ausdruckbeziehung*) vlastitih psihičkih procesa. Kada bi se psiho-fizička svojstva druge osobe bolje poznavala mogla bi se umjesto obilježenih svojstava okarakterizirati i boljom i točnijom tvorbom ino-psihičkih objekata. Ino-psihičko se poput vlastito psihičkog dopunjuje privođenjem podsvjesnog. Za tvorbu ino-psihičkog mora se koristiti i 'odavanje znakova' odnosno govor drugog. Navodi druge osobe se nadalje vrednuju u smislu tvorbe a obogaćuje se i ino-psihički objekt bez dovođenja nečeg principijelno novog u objekt. Vrednovanje navoda ne ide na uštrb vlastite psihičke osnove, jer su navodi već zasnovani na njoj. Razmjena 'znakova' stvara identitet inter-subjektivnih objekata. Upravo su ti inter-subjektivni objekti predmet znanstvenih istraživanja. Primarni duhovni objekti, dakle oni kojima ništa ne prethodi, pri tome se tvore iz psihičkih objekata. Konstituiranje duhovnih objekata iz psihičkih nije psihologiziranje, jer sami duhovni objekti

grade nove sfere objekata. Konstitucija duhovnog počiva na ispoljenim odnosima (njem. *Manifestationsbeziehungen*) [8, str. 156].

### 3.2 Razgraničenje nekih filozofskih problema na temelju Carnapove teorije tvorbe

Određivanje bitka Carnap svodi se na više pitanja. Jedno od njih je određivanja identiteta znakova u govornoj uporabi. Drugo pitanje bitka je određenje psihičkog, fizičkog i duhovnog koji, su za Carnapa kvazi-objekti, razgovorne poštapalice za prikazivanje odnosa određenih doživljaja. Stvarnost njihovog postojanja pri tome leži u metafizičkom bitku objekata koji je izvan područja znanosti [8, str.161]. Problem dualizma duše i tijela kao odvojenih objekata: to su dva različita oblika poredaka osnovnih elemenata. Osnovni elementi su samo jedna vrsta a poredaka može biti po volji mnogo. Pitanje jastva je po Carnapu klasa koja se tvori na višoj razini iskustva. Pitanje nakane se nalazi u procesnom događaju i onom po njoj zamišljenoj predmetnosti, kao razlika između određenog predmeta i njegove predodžbe.<sup>IX</sup> Pitanje uzročnosti postoji u fizičkom svijetu, ali je konstrukt psihičkog u znanosti poznatog kao funkcijska ovisnost.

### 3.3 Carnapova teorija informacije i stvarnost

Dok je doprinos Carnapa filozofiji oštro ograničen na logicizam i formalizam verbalizacije, njegov doprinos teoriji informacije otvara posve drugačije pristupe stvarnosti – barem u osnovnim postavkama njenog fizikalno-matematičkog opisa [9].

Prvo i prvo njegov pojam entropije se ne odnosi na anonimne 'stohastičke strojeve' molekulskih dimenzija u apstraktnoj arhitekturi nekog stroja poput mehanicističke entropije Boltzmannova već na konkretnu arhitekturu tih strojeva i okolnosti njihove uporabe. To je postigao uvođenjem entropijskog opisa prostorno-vremenskih situacija nekog (funkcijskog) aranžmana, što je uostalom bila tema njegovog doktorata iz 1922. godine, *Der Raum* (hrv. *Prostor*) [10]. Postoji bitna razlika pojedinih entropijskih pristupa opisu svijeta, jer dok je Boltzmann svojim pristupom otkrio osnovne fizikalne konstante prirode poput Boltzmannove konstante, Carnap je pošao od puno težeg ali i konkretnijeg zora trenutne konstelacije nekog mehanizma gdje se ta termodinamika ispoljava, nešto poput *aranžmana okolnosti*. Ovime je i razina dosega uporabe Carnapove entropija znatno nadrasla onu Boltzmannovu.

Dok Boltzmann definira jedno stanje svojih sustavskih elemenata kao energiju i gleda jedino njezinu razdiobu u po njemu formiranih  $n$  - ćelija 'energetskog prostora', Carnap svakom elementu sustava pridjeljuje svoj fazni prostor. Svaki element Carnapovog prostora međutim može posjedovati svojstva poput energiju i stvarnog prostora koji zauzima s obzirom na ostale elemente sustava, ali može

<sup>IX</sup> Ovdje je Carnap nakani predodredio posve skromnu ulogu, npr. pri temeljenju osobnog cilja pojedinca

iskazivati i osobine duhovnog objekta cit. „*elements may be the entities of any kind whatever*“ [9, str.77]<sup>x</sup>. Carnap definira dva osnovna prostora:  $R^\mu$ , n-dimenzionalni cjelokupni  $\mu$  – prostor stanja sustava i  $V$  - prostor stanja 'tijela' sustava slika 1. predočivog s  $a_N$  elemenata, svakog  $a_i$  sa svojim okolišem  $e_i$  volumena  $v_i$ , gdje je

$$V = \sum_{i=1}^N v_i \quad (1).$$

Za sustav okoliša elemenata vrijedi ispunjenje uvjeta [9, str.79]:

Svaki  $e_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) je podskup od  $R^\mu$ .

Za svaki  $e_i$  je pripadni  $v_i > 0$ .

Okoliši dviju elemenata se ne preklapaju.

Sve točke s izuzetkom točaka s mjerom jednakom ničtici pripadaju jednom i samo jednom od  $N$  okoliša.

Razmak bilo koje dvije točke faznog prostora je veća od ničtice.

Okoliš  $e_i$  neke fazne točke je skup svih onih točaka faznog prostora koje su najbliže faznoj točki  $a_i$ .

Računanje entropije nekog sustava svodi se tada na određivanje zbroja težinskih udjela logaritma pojedinih elemenata u sustavu tj. na

$$H_N = \sum_{i=1}^N \frac{v_i}{V} \ln \frac{v_i}{V} \quad (2).$$

Nekoliko međusobno vezanih pitanja Carnap nije detaljnije razradio: različitost pojedinih elemenata<sup>xI</sup>, određivanje okvira domene u razmatranju, točnu specifikaciju područja pojedinih rubnih elemenata i moguća područja primjene<sup>xII</sup>.

## Različitost pojedinih elemenata i pitanje rubnih područja

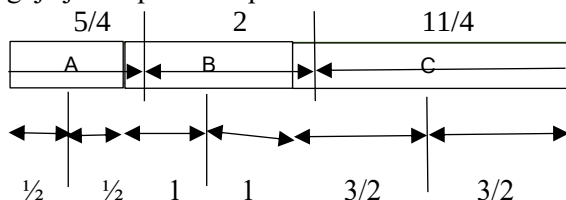
Uvođenje nejednakih važnosti ili masa u elementima sustava je Carnap riješio tako da je sumirao entropijske udjele pojedinih elementarnih volumena te bi entropija bila izražena kao [9, str.81]

$$H_w = \sum_{i=1}^N v_i \left( \frac{w_i}{v_i} \ln \frac{w_i}{v_i} \right) \quad (3),$$

što vodi do izraza za entropiju

$$H_w = \sum_{i=1}^N w_i \ln \frac{w_i}{v_i}, \quad (4).$$

Carnap je ostavio neodređenu razradu granica  $v_i$  različito otežanih elementarnih volumena, dakle veličinu 'otežanih' elementarnih volumena. Razmotrimo situacije entropije sa i bez težinskih elemenata prikazanih na slici 1., gdje je ukupni fazni prostor dužina od 6 dužnih jedinica.

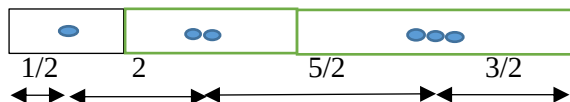


<sup>x</sup> Ovdje je Carnap 'nadmašio sama sebe', ali je 'pobjegao' iz faznog prostora diferencijalnih jednadžbi

<sup>xI</sup> osim različitosti međusobnih položaja

<sup>xII</sup> s izuzetkom pridjeljivanja opisnih svojstava elemenata s različitim utjecajima, težinama

Sl. 1. a) podjela faznog prostora triju fiksno pozicioniranih elemenata A, B i C; veličina prostora podijeljena je namjerno u omjeru 1:2:3 a težine su jednake; Carnapove granice daju omjere  $5/4 : 2 : 11/4$



Sl. 1b) Isti fazni prostor kao u 1a) no težine elemenata su  $w_A = 1$ ,  $w_B = 2$  i  $w_C = 3$ ; veličine faznih prostora su i nadalje u omjeru 1:2:3, odnosno  $5/4 : 2 : 11/4$



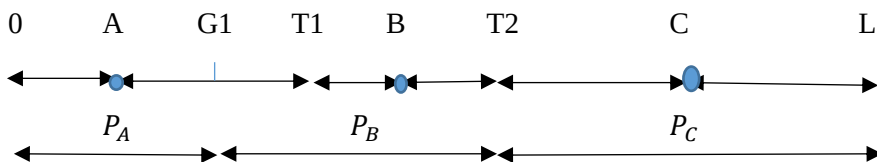
$1/2 + 1/2 = 1$   $1 + 2/5 * 5/2 = 2$   $3/5 * 5/2 + 3/2 = 3$

Sl. 1c) Fazni prostor triju elemenata s težinama  $w_A = 1$ ,  $w_B = 2$  i  $w_C = 3$  no podjela faznog prostora je sukladno međusobnim utjecajnim faktorima težina – tako da se prostor između A i B dijeli u omjeru 1/3 prema 2/3 a prostor između B i C dijeli u omjeru 2/5 prema 3/5; razmjeri su opet 1:2:3

Sl.1.: Razrada granica područja različitih težinskih elemenata

Pojedini element faznog prostora 'otežan' odgovarajućim cjelobrojnikom međutim ne bi davao praksi primjeren rezultat entropije ako se ne bi mijenjao odgovarajući fazni prostor. Mijenjanjem udjela faznog prostora s odgovarajućim realnim a ne samo cjelobrojnim težinama pojedinih elemenata vodi do mogućnosti rješenja problema gibanja više tijela, što je izneseno ranije [11].

No ono što sigurno nije definirano su granice domene promatranog sustava elemenata. Da bi elementi komunicirali ili bili međusobno povezani, a to je osnovna pretpostavka tvorbe sustava [12], možemo pretpostaviti da se nalaze na nekoj vrsti vage i da tako održavaju ravnotežu. Područja koja oni tako zauzimaju određena su granicama, slika 2.



Sl. 2.: Jednoliki razmještaj točaka A, B i C s težinama 1, 2 i 3 na dužini L; T1 je položaj težinske ravnoteže točaka A i B, a T2 je ravnotežni položaj točaka T1 i C; područja prostiranja domena točaka su  $P_A$ ,  $P_B$  i  $P_C$  uz pretpostavku zrcalnog produženja domene na svojim krajevima

## Primjena Carnapove entropije na stvarne situacije

Druga razlika je uvođenje ciljne funkcije, ciljnosti i smislenosti rada nekog mehanizma. Bio to mehanizam kretanja nebeskih tijela ili 'mehanizam odigravanja

sportskog susreta'. Na taj je način Carnap otvorio mogućnosti odgovora na neka pitanja poput mehanizma ponašanja elektromagnetskog polja, ali omogućio i egzaktan pristup nekim složenijim mehanizmima ljudskog ponašanja.

#### **4. Informatička tehnologija u okvirima filozofsko-političkih ograničenja 19. i 20. stoljeća**

U svom djelu iz 1909. godine pod naslovom 'Materijalizam i empirio-kritika' V. I. Lenjin je između ostalog započeo oštru kritiku 'nestanka materije' iz Machove moderne fizike favoriziranjem „relativnosti spoznaje“ [1]. No ne samo što je materija 'izgubila tlo pod nogama' već ni sustavi nisu prepoznati kao osnovica opisa svijeta, kao što svjedoči von Bertalanffy u svojoj općoj teoriji sustava [12]. Društvena situacija dovela je do toga da se spoznajno-pojmovna kategorija rascijepila u biologiji nakon II svjetskog rata na materijalističko-mehanicističku, biološko-organizmičku i vitalističko-idealističku [12].

No najgore je prošla jedna nova znanost u nastanku: komunikacijsko - informatička znanost.

Tragedija i stoljetno zaostajanje za informacijsku znanost je i slijepo držanje Lenjina uz svoju tadašnju znanosti suprotstavljenu tezu, cit. [1, str.175, drugi pasus] *There is nothing in the world but matter in motion, and matter in motion cannot move otherwise than in space and time<sup>xiii</sup>*. U tom temeljnom stavu lenjinizma mjesto za informaciju ne može se ni naslutiti. Štoviše svako koketiranje s nečim tako apstraktnim, a istodobno bolno konkretnim, bilo je temeljito izbačeno iz doktrine: to bi bio *machizam*. Konkretna posljedica ovog sljepila je npr. ogromno zaostajanje ruske informatičke (vojne) tehnologije za onom svjetskom. No ni drugdje nije puno bolje: usprkos zaklinjanju na ogroman napredak elektroničke tehnologije sama informatička znanost ostala je u poveljama američkog mehanicizma.

Djelo *Materijalizam i empiriokritika* bio je između ostalog motiviran uklanjanjem Bogdanova s pozicije šefa komunističke partije Rusije te 1908 godine. Ako ostavimo po strani izravan napad V. I. Lenjina na Bogdanova, fundamentalnog mislioca opće teorije sustava, sama postulacija lenjinizma isključivala je mogućnost postavljanja opće teorije sustava kao takve. Lenjinizam, kakav je postuliran 1908/09, a objeručke prihvaćen po Lenjinovoj smrti kao ideološka praksa staljinizma, bio je po Harariju zapravo jedna nova religija [13].

Ta religija, tada u nastajanju, a kojoj se još uvijek klanja dobar dio

<sup>xiii</sup> Ništa ne postoji u svijetu osim materije u kretanju, koje kretanje materije se ne može nego ostvariti u prostoru i vremenu

čovječanstva, nije mogla trpjeti ni pozitivizam u nastajanju, sklepan od dijelova idealizma, Ernsta Macha, i njemu suprotstavljenog nedijalektičkog materijalizma Dühringa. Da se citira Lenjin [1, str.337]: *...without...taking seriously the endless attempts to "transcend" the "one-sidedness" of materialism and idealism, to proclaim a new trend - some kind of "positivism", "realism", or other professorial charlatanism*<sup>XIV</sup>.

Reakcija političke javnosti na pojavu 'dematerijalizacije stvarnosti' nastalu istraživanjima kvantne mehanike i teorije relativnosti pojačala se počevši od 20-tih godina 20. stoljeća: nacistička materijalistika<sup>XV</sup>, sovjetska dijalektičko-materijalistička škola i američka mehanicističko-funkcionalistička škola<sup>XVI</sup>. Zbog pojave ovih politički utjecanih platformi biološko-organizmička teorija von Bertalanffyja teško je dolazila do izražaja još od 30-tih godina 20. stoljeća sve do danas<sup>XVII</sup>.

No i sama OTS trpjela je od jednog drugog odvajetka američke mehanicističke teorije, famozne teorije informacije Shannona i Weavera [14]. Ova pragmatična inačica kodiranja poruka u informacijskom kanalu pretpostavlja da su rijetke pojave kodova na kanalu veće informatičke vrijednosti od onih češćih. Ova semantički neispravna arogancija, koja je dobro došla u skraćivanju poruka i ubrzala nekadašnje spore komunikacijske kanale, unijela je svojom popularnošću totalnu zbrku i u OTS, zbrku koja je pomiješala pojam termodinamičke i komunikacijske entropije, stavila ih u isti lonac i onda izvlačila nebuloze poput „negativne entropije živih bića“ [12, str. 129].

## 5. „Smrt eksperata“ ili današnje stanje informatičke stvarnosti

Kontakt pojedinca s apstraktnim prostorima informacije je fascinantan. Informacijska poluga, koju je pojedinac dobio zadnjih dvadeset godina, puno je jača od poluge njegovog zamišljenog pretka u nekom zamišljenom kamenom dobu. Pojedinac se počeo osjećati svemoćnim. Stvorio se novi mit: svemoć u nepostojećem. No ako ste ušli u taj mit, a neka se javi tko nije, onda vam više ne

<sup>XIV</sup> a da se i ne uzme ozbiljno beskrajno pokušavanje „transcendiranja“ one „jednostranosti“ materijalizma i idealizma, ne bi li proglasili neki novi trend – neku vrstu „pozitivizma“, „realizma“, ili inog profesorskog šarlatanizma

<sup>XV</sup> nacisti su kvantnu fiziku nazivali 'židovskom fizikom' – i zabranili je sve dok nisu bili prisiljeni na razvoj nuklearnog oružja – no nisu ga dali izravno u ruke Heisenberga – nije im bio osoba od povjerenja

<sup>XVI</sup> Heisenberg je bio zgranut kada je tijekom boravka u SAD-u kontaktirao američke fizičare u vezi s kvantnim prikazom stvarnosti; njih naime nije zanimala valjanost predodžbe nego samo funkcionalnost teorije; Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik. Piper, München 1969 (7. Auflage. 2001, ISBN 3-492-22297-8)

<sup>XVII</sup> 1933. je von Bertalanffy nacrt opće teorija sustava stavio u ladicu – boja se reakcije mehanicista, nacista,...

trebaju eksperti – vi ste ekspert za sve.

U svojoj studiji suvremenog američkog društva pod naslovom *Fantasyland* (hrv. 'Zemlja umišljaja') Kurt Andersen ponavljano naglašava s kojom se žestinom američko mehanicističko društvo obračunavalo i danas se obračunava s ekspertima [15]. U zamjenu za zdravorazumskim (engl. commonsense<sup>xviii</sup>) prihvaćanjem svijeta informacijske mreže su postale medij poluobrazovanih i etički potpuno 'ispranih' ljudi. Nisam ni sam bio svjestan koliko su mediji pod utjecajem npr. poluobrazovane Oprah Winfrey oprale mozak današnjoj Americi, dok nisam shvatio koliko protiv-ekspertni stav imaju naši obrazovani ljudi u vezi npr. s pandemijom korone.

Pokušajmo postaviti bitne filozofske zamjerke takvom mehanicističkom doživljaju stvarnosti.

Prva zamjerka bila bi ona ontološke prirode. Ontologija bi po *Merriam Webster* rječniku bila:

- a) Grana promišljanja (metafizika) koja se bavi prirodom i odnosima apstraktnih pojava
- b) Posebna teorija koja se bavi prirodom bića i postojećih stvari

Ovakve Humeovske definicije 'onoga što jest' samo mogu doprinijeti porastu machizma u društvu (tu sam lenjinist!). One su proturječne. Je li nečiji umišljaj 'ono što jest'?<sup>xix</sup> Da bi nešto bilo 'ono što jest' treba imati mogućnost sudjelovanja u 'onom što jest'. Umišljaj bez (kvantne) povezanosti s okolišem ne bi trebao biti 'ono što jest'. Ako ne sudjeluju u 'onom što jest' onda ne spadaju u gornju definiciju pod b).

Druga je zamjerka ona gnoseološke prirode. Definicija gnoseologije po *Merriam Webster* rječniku glasi: *gnoseologija je filozofska teorija znanja: propitivanje osnove, prirode, valjanosti i granica spoznaje (znanja).*<sup>xx</sup> Ova definicija pati od sebe same: propitivanje može biti izvedeno pojmovno-rječničkim alatom, osim ako nije pokusom. Opis pokusa opet je dan pojmovno-rječničkim alatom. Valjano propitivati nešto se može samo alternativnim alatom. Ukoliko je rezultat u okviru polaznih pretpostavki neproturječan može se pokušati prevesti u

<sup>xviii</sup> *good sense and sound judgement in practical matters* (hrv. dobar osjećaj i zdravo prosuđivanje u praktičnim pitanjima)

<sup>xix</sup> ovdje germanski jezici nisu od neke pomoći: za razliku od slavenskih koji iskazuju da nečega nema sa dvostrukom negacijom, npr. 'Ništa ne vidim' (ako ničega tamo nema); germanski jezici navode: 'I see nothing'; 'Ich sehe nichts';

<sup>xx</sup> Epistemologija bi se trebala baviti 'znanstvenim znanjem'; ovakvo nešto negira Willard van Orman Quine

polazni jezik.

Suvremeni mediji, međutim zaobilaze prvu zamjerku i umišljaj multipliciraju, oni ga doslovno usade u ljude i on postaje (istina mehanicističkim načinom stvorena) stvarnost. Teška zabluda!

Drugu zamjerku suvremeni informatički mediji samo naglašavaju smanjivanjem rječničkog blaga, pojednostavljenjem, primitivizmom i podilaženjem korisniku medija, žutim tiskom i sličnim komercijalom obilno potpomognutim protu informacijskim sredstvima. To je društvena bolest zvana primarno kapitalističko društvo, koje je u stanju samo održivosti (tu sam opet lenjinist!).

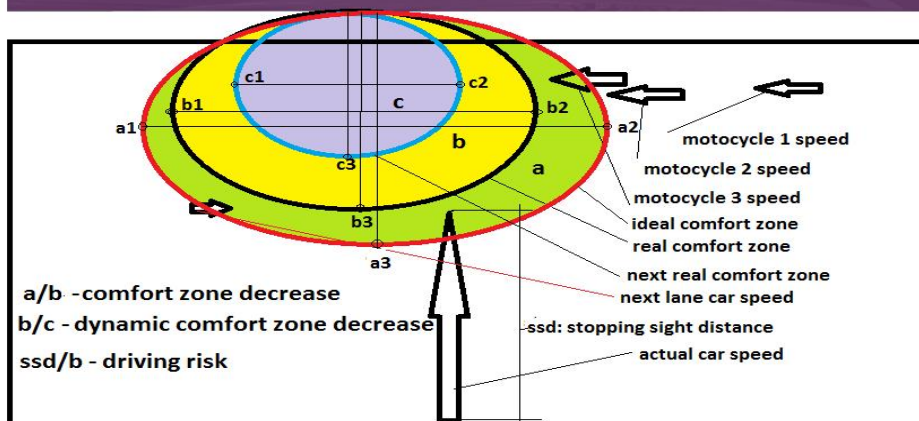
Informacijska stvarnost traži pod hitno alternativnu ili bolje reći obnovljenu vremensko-funkcijsko-prostorno definiranu gnoseologiju.

Primjer jedne takve jezične osnove dajem u sljedećem prikazu.

Neka je prometna situacija na mostu na zapadnom prilazu Kōlnu dana slikom 3. [11, 16]. Neka je zadatak informacijskog agenta stvoriti što bolju sliku aranžmana okolnosti u cilju očuvanja zadanog stupnja rizika ili komfora u prometu. Osnovo je dakle odrediti o čemu je riječ, to jest u ontologiji apstraktnog u tom aranžmanu okolnosti. Osnovna apstrakcija je određivanje intencije prometnih subjekata, te dinamike te intencije, slika 3. dolje. Gnoseologija bi trebala propitivati granice tog apstraktnog.

Rizik je definiran sigurnim prostorom ABC tehnikom [16]. Prostor idealne komformne trenutne vožnje, označen s  $a$ , određen je odmakom od susjednog vozila ( $a1$ ), bankine ( $a2$ ) i razlike brzina vozila u istoj prometnoj traci ( $a3$ ). Prostor realne komformne zone određen je potencijelnim pomicanjem vozila u lijevoj susjednoj voznoj traci ( $b1$ ), primicanjem motorkotača s desne strane ( $b2$ ) i neodređenošću položaja vozile ispred ( $b3$ ). Sljedeća komformna zona određena je potencijalnom nakanom pomaka vozila u susjednoj lijevoj traci ( $c1$ ), potencijalnom nakanom motociklista 3 da krene u preuzimanje prostora ( $c2$ ) i potencijalnom nakanom vozila ispred da uspori svoje kretanje ( $c3$ ).





Sl.3.: Slika aranžmana prometnih okolnosti na prilazu mostu u Kölnu (gore) i apstraktni prostori potencijalne situacije za izračun trenutnog rizika vožnje (dolje)

Omjer površina  $a/b$  određuje smanjenje zone komfora vožnje, omjer  $b/c$  određuje dinamiku smanjenja zone komfora, a omjer sigurnog područja zaustavljanja i  $b$  određuje trenutni rizik vožnje.

Rad agenta možemo dizajnirati tzv. *modelom četiriju koraka*, koji sadrži aranžman okolnosti<sup>xxi</sup>, apstrakciju<sup>xxii</sup>, ciljnu funkciju<sup>xxiii</sup> i izračun<sup>xxiv</sup>. Prikazani rad agenta manje-više je razumljiv uobičajenom jeziku tehničkih opisa, no to nije jezik svakodnevnice. To je primarno prostorno-vremenski jezik opisa dane situacije i potencijalne dobiti/gubitka korisnika prometnog procesa.

Ovakvom prikazu, međutim nedostaju osnovni elementi humane komunikacije: savjest, obred i racio.

<sup>xxi</sup> Osnovni carnapovski element konstrukcije situacije

<sup>xxii</sup> Apstrakcija situacije sadrži barem jednu apstraktnu mjeru aranžmana okolnosti, često je to ključna prostorna mjera

<sup>xxiii</sup> Ciljna funkcija može biti izvršenje nekog zadatka u konkretnom ili apstraktnom prostoru poput dobiti ili profita kompanije

<sup>xxiv</sup> Obično se izračunava rizik danog aranžmana okolnosti

## 6. Savjest, obred i racio – tri iskušenja današnjice

Postupati po savjesti tradicionalni je način svakodnevnog ponašanja mudrih ljudi. To je barem jasno. Manje je jasno što bi to trebao predstavljati obred. Prema Mircea Eliadeu obred je osnovni način postojanja bilo koje ljudske zajednice [17]. Postoje ljudske zajednice kod kojih je to naglašenije i one kod kojih je to potisnutije. No za svaku je ljudsku zajednicu nedostatak obreda katastrofan [18]. Obred naime olakšava proces individuacije, cit [18],

*Auf dem Weg seiner Individuation ist der Mensch immer wieder gefordert, sich aktiv und bewusst den neu auftauchenden Problemen zu stellen und seine Entscheidungen vor sich selbst zu verantworten. Individuation bedeutet, sich nicht danach zu richten, „was man sollte“ oder „was im allgemeinen richtig wäre“, sondern in sich hinein zu horchen, um herauszufinden, was die innere Ganzheit (das Selbst) jetzt hier in dieser Situation „von mir oder durch mich“ bewirken will<sup>xxv</sup>.*

jer olakšava put prema unutrašnjoj cjelovitosti. Stavljanje maski, danas tako pomodno tetoviranje, ustvari je vapaj za individuacijom.

No obred uključuje i jezik. Ako tako postupamo bili bismo racionalni. To bi, međutim, mogao biti nerješiv problem na kojem se slomio i Bečki filozofski krug.

## 7. Prema sintetskom jeziku u svijetu rizika

Jezik kojim komuniciramo je zapravo obredni jezik. Jezik tržnice, znanosti, mehaničke radionice, školskog dvorišta, operne scena ili romana je istina različiti ali ipak obredni jezik, jer se odvija unutar zadanih okolnosti, pragmatike i cilja u kojem se nalazi pojedinac ili grupa. Dakle nije isti već je prilagođen danoj sceni danog scenarija i danim okolnostima. Naravno mi ne moramo biti svjesni obredne situacije no isto tako nismo svjesni ni mita koji živimo. Rijetki, vrlo rijetki, pojedinci uspiju se izvući, istina ne stalno, iz svoje mitske sheme [19].

Sintetski jezik trebao bi ispunjavati sljedeća svojstva: jasnoću i jedinstvo svoje sintakse, semantike, pragmatike i ciljnosti. Da bi to ispunio nužno je objediniti isto na osnovi prostorno-funkcijske paradigme. Ova bi trebala uključiti u svoju ontologiju prostor, informaciju i vrijeme a u svoju gnoseologiju sposobnost propitivanja relacija tako određene ontologije. Osnova sintetskog jezika bila bi

<sup>xxv</sup> na putu svoje individuacije se od čovjeka uvijek ponovno zahtijeva aktivno i svjesno postavljanje na novonastali problem i sam na svoje odluke pred sobom odgovoriti. Individuacija znači ne ravnati se prema onome „što treba“ ili „što bi općenito bilo ispravno“, već unutar sebe poslušati, ne bi li našao što unutarnja cjelovitost (sebstvo) sada ovdje u ovoj situaciji „od mene ili kroz mene“ želi ostvariti

stalni nadzor nad strukturama kvantitativno-kvalitativnih transformacija svih navedenih parametara jezika.

O čemu je tu riječ?

Kada želimo utipkati na tastaturi neki znak pomičemo ruku – tu smo u analognom, kvantitativnom svijetu. Položaj ruku i prstiju možemo odrediti. Tek pritiskom na tipku, dakle malom promjenom kvantitete u položaju vrha prsta, dolazi do promjene kvalitete unosa znaka u računalo. Ova pretvorba je bitna za stvaranje podatka. Slično tome se ta kvaliteta pretvara u kvantitetu kada utipkani znak dovodi do naloga za pomak glave printera. Ovaj trik međusobnih izmjena kvalitete u kvantitetu je osnovica bilo kojeg memorijskog sklopa, algoritma umjetne inteligencije, dubinskih neuronskih mreža, fuzzy logike, npr. prilikom prepoznavanja značajki nadziranog procesa. Kada se sekvencija rada u analogno/digitalnom smjenjuje sa sekvencijom digitalno/analognog svijetu onda imamo klasični slučaj digitalnog regulatora, kod višestrukog ponavljanja s normalizacijom imamo neuronsku mrežu a kod postupka entropijskog uravnoteženja višestrukih ponavljanja pretvorbe kvalitativnog u kvantitativno imamo dubinske neuronske mreže. Konačno i naši neuroni se ponašaju na istom principu pretvorbe kvantitativnog (sinapsa) u kvalitativno (prag podražaja).

Svijet u kojem živimo je permanentna, paralelna, istodobna na svim mjestima i svevladajuća kvalitativno - kvantitativna pretvorba, jako daleko od vizije monotone hrpe kamenja u kretanju, kako je to pojednostavljeno snatio Lenjin u švicarskom izgnanstvu. I svjetski se mitovi diversificiraju i mijenjaju, nastaju i nestaju [19]. Svijet postaje primarno rizičan. Pokušajmo ilustrirati mogućnost uporabe sintetskog jezika na primjeru razrade rizične situacije u rukometnoj igri, detalji objave su u tijeku [20]. U realnom svijetu, svijetu živih bića, društava i korporacija vlada interes, odnosno svima su ‘nametnuti ciljevi’, htjeli to oni ili ne. Ciljevi se mogu ostvariti uz stanovite rizike; u principu sve postojeće je rizik za nekoga tko teži ostvariti svoj (sebični, nesebični, nametnuti) cilj. Promjenjive veličine koje utječu na rizik ostvarenja nečijeg cilja možemo nazvati varijablama rizika. Varijable rizika mogu biti konkretne poput *indeksa tjelesne mase* ali i apstraktne poput *straha od tame*. Kako odabrati i obraditi skup varijabli rizika? O tome je riječ!

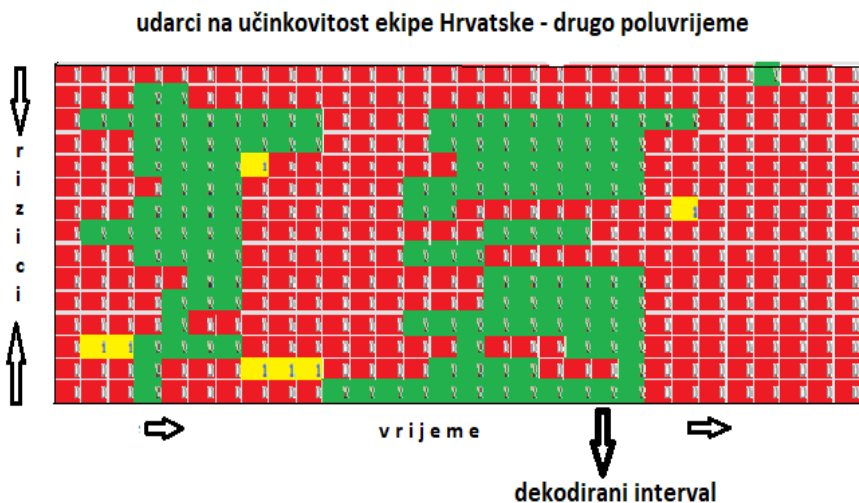
Glavne osobine faznog prostora varijabli rizika su apstraktnost, višedimenzionalnost i promjenjivost. Suodnosi varijabli u prostoru stanja varijabli rizika su suptilni, jer su granice prostora teško odredive, pa se temelje na lingvističkom opisu, tabuima. Semantika prirodnih jezika počiva na prostornom konceptu. Umjetni jezici poput Fortrana nemaju prostornu semantiku, akcija je osnova njihove informatike. Semantiku situacije opisuje okolina situacije, stvarne ili zamišljene. Opis neke situacije u svijetu rizika izvodi se verbalno uporabom većeg broja varijabli i njihovih odnosa

Umjetna inteligencija može u faznom prostoru apstraktnog opisa varijabli i njihovih djelovanja dobiti odgovarajući oslonac za egzaktnu interpretaciju situacije samo uz pažljivo odabrane informacijske postupke. Postupak se mora prilagoditi svakoj stvarnoj situaciji: mehanicističkoj ili organizmičkoj. Traži se određivanje: scenarija, nositelja procesa, funkcije cilja i rizičnih varijabli. Osnovno za postupak projektiranja jest odrediti mjeru cilja. Mjera ispunjenja cilja je kvaliteta izvođenja nositelja proizvodnog procesa, pojedinca ili ekipe. Rizične varijable vezane su za rizične događaje, njihov opis. Praćenje rizičnih varijabli kada su to događaji (engl. *events*) je informacijski osjetljiv postupak. Mjerne varijable poput temperature su jednostavnije za obradu. Što su nužni i dovoljni uvjeti za primjenu informacijske tehnologije?

Skup rizičnih varijabli i funkcijski cilj su strogo povezani – čine informacijski sustav u kojem su varijable rizika moguće smetnje ostvarenja cilja. Sustav se pokorava određenim pravilima koja mu daju organizmički karakter. Kodiranje varijabli je jednoznačno. Za očuvanje informacijske jednoznačnosti koriste se četiri uzastopna intervala praćenja varijabli i ekspanzirana Carnapova entropija za potrebe jednoznačnog kodiranja i izračuna informacijskog sadržaja varijabli i ciljne funkcije [20].

Za studiju rizika valja odrediti: ciljnu funkciju – učinkovitost ekipe; za rukomet kao gol po napadu. Rizične varijable su sve vrste događaja. Izabrane su varijable: ukupno golova, ukupno napada, faulovi ekipa A, faulovi ekipa B, sedmerac A, sedmerac B, greške suci A, greške suci B, zamjene A, zamjene B, isključenja A, isključenja B, intervencija trener A, intervencija trener B, i sve greške u igri

Interval praćenja je jedna minuta. Na temelju snimke odvijanja utakmice prikupljeni podaci su nakon jednoznačne informatičke obrade prikazani impaktogramom na slici 4.



Sl. 4.: Impaktogram drugog poluvremena rukometne utakmice Danska - Hrvatska 2014 u Herningu; crveno i žuto su naznačeni periodi 'organizmičke' a zeleno 'neorganizmičke' igre ekipe Hrvatske

Naznačeni interval na slici 4. se dekodira na sljedeći način (A - ekipa Danske, B - ekipa Hrvatske):

*U 51. minuti utakmice, praćenjem i obradom 7-minutnog okvira, učinkovitost ekipe B može se povezati s varijablama: svi faulovi obiju ekipa, svi napadi obiju ekipa, sedmerac u korist A, greške sudaca u korist A, zamjene u ekipama A i B, isključenje u ekipi A i sve greške u ekipama.*

## Rasprava i zaključak

Dan je pomalo hermetički pristup tematici značenja, utjecaja i dosega Bečkog filozofskog kruga. Jedan od razloga te zatvorenosti u pristupu jest tematsko lutanje svjetski utjecajnih glavnih aktera tog kruga i tijekom rada i nakon raspada Kruga. Osnovna nikada dovoljno naglašena dilema kretala se oko etike. To se osobito izrazilo u Wittgensteinovim radovima, na što je skrenuo pozornost von Foerster. Kao umni ljudi shvatili su da su i egzaktne znanosti poput matematike i filozofske discipline poput empirizma postale predmetom igre riječi, što je najmanje poželjna etička situacija. Međutim doprinos koji je dao Carnap svojom studijom prostora informacije i svojim radovima na 'sintetskom jeziku znanosti' su danas gotovo nemjerljivi, iako ih je on vrlo oprezno nametao.

U radu je izveden jedan pokušaj sinteze ovih dviju Carnapovih zasada na predstavljaju principa stvaranja 'informacijski zasnovanog znanstvenog jezika'. Kao baza su uzete pretpostavke Eliadea o obredu kao esencijalnoj potrebi individuacije čovječanstva, koje daju igre u čovječanstvu te organizmički karakter sustava igre kakvog je zastupao von Bertalanffy. Pretpostavka primjene na rizične situacije u grupnom natjecanju omogućile su generiranje jednostavnog determinizma opisa zasnovanog na informacijski jednoznačnoj situaciji igre. Ovakvim načinom je dobiven jezički predložak za etički jasnu sintezu situacije koja je informacijski ispravna ali nije sama po sebi ni ugodna niti lijepa.

## Literatura

- [1] V. I. Lenjin, *Materijalizam i empirio-kritika. Kritičke primjedbe o reakcionarnoj filozofiji*, <https://www.marxists.org/archive/lenin/works/cw/pdf/lenin-cw-vol-14.pdf>, pregled 4.2.2023.
- [2] F. Stadler, *Studien zum Wiener Kreis*, Suhrkamp, Frankfurt 1997.
- [3] D. Edmonds, J. Eidinow, *Wittgensteinov žarač*, Algoritam Zagreb, 2004.
- [4] R. Carnap, *Der logische Aufbau der Welt*, Felix Meiner Verlag Hamburg, 1998, str. XVII-XXII.
- [5] B. Russell, *A. North Whitehead, Principia Mathematica*. 3 vols. Cambridge: Cambridge University, Press 1910-1913.
- [6] C. G. Hempel, Problems and Changes in the Empiricist Criterion of Meaning, 11 *Rev. Intern. de Philos.* 41 (1950), str. 41-63.
- [7] M. Friedman, *Preispitivanje logičkog pozitivizma* (New York: Cambridge University Press, 1999.), str. xiv.
- [8] R. Carnap, *Der logische Aufbau der Welt*, Felix Meiner Verlag Hamburg, 1998, str. 268.
- [9] R. Carnap, *Two Essays on Entropy*. *Shimony, Abner*, ed. University of California Press, 1977., ISBN: 0-520-02715-9.
- [10] R. Carnap, *Der Raum: Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre, Kant-Studien, Ergänzungshefte*, no. 56 (*doctoral thesis*), 1922.
- [11] F. Jović, B. Balać, Entropijski modeli sigurnosti, Povijest i filozofija tehnike, 10. simpozij PIFT 2021, ur. Franjo Jović i Zvonko Benčić, KIKLOS – krug knjige, Zagreb 2022, str. 47-66.
- [12] L. von Bertalanffy, *Opća teorija sustava*, Kiklos - Krug knjige, Zagreb, 2022. ISBN: 978-953-7992-16-3.
- [13] Y. N. Harari, *Sapiens, Kratka povijest čovječanstva*, FOKUS KOMUNIKACIJE, Zagreb 2021, ISBN: 978-953-713-65-7, str.255.
- [14] C. Shannon, W. Weaver, Warren, *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press. 1 September 1998, ISBN 978-0-252-72546-3.
- [15] K. Andersen, *Fantasyland*, Ebury Press, London 2018, ISBN 9781785038679.
- [16] Jović, F., Prostorna informacija u umjetnoj inteligenciji – mjera, doseg i projektiranje, Skup: Čovječanstvo pred izazovom vještačke inteligencije, Brčko 19.5.2023., u objavi.
- [17] M. Eliade, *Rječnik obreda*, Kršćanska sadašnjost, Zagreb 2022.
- [18] Tewes Wischmann: *Der Individuationsprozess in der analytischen Psychologie C. G. Jungs - eine Einführung*. 2. Auflage. Heidelberg 2000.

[19] Jung, Hero with thousand faces,

[20] Jović, F., Jović, A., Metoda i uređaj za nadzor učinkovitosti kooperativne ekipa u konkurentnom okruženju, DZIV, prijava 29.3.2023.

Franjo Jović

## INFORMATIC HERITAGE OF THE VIENNA PHILOSOPHICAL CIRCLE

### Summary:

The reaction of philosophers to the remarkable advances of physics at the beginning of the 20th century: machist, classical materialists and Lenin. The stalemate of the progress of science caused by almost simultaneous political predicament: war, revolution and nazism. The contribution of Central European philosophical-scientific thought to today's technological state. Moritz Schlieck's Vienna Philosophical Circle as an advocate of a realistic exposure to reality between two wars. The position and engagement of Rudolf Carnap in the theory of the statement of scientific representation of reality. Data processing on Carnap principles, logical-memory operations and their philosophical trivalent basis: self – thing - thought. The crisis and the end of the activities of the Vienna Philosophical Circle. Suppression of the reach of computer science and general systems theory by mechanists and vulgar materialists after World War II. Political reality according to the general theory of systems by Ludwig von Bertalanffy. Carnap reality representation technique, especially Carnap's concept of spatial-target information. Deviations of philosophy in a society imbued with a mechanistic approach to information. Kurt Andersen and the end of experts: The unreality of today's manipulative information. Model of general system theory and ritual theory as an organismic filter of reality. Proposal of a synthetic language of describing the world of risk based on information technology.

**Keywords:** socio-political conditions in the 20. century, theory of logical implications, Carnap information theory, design for risk, quasi-organismic system



*Darko Fischer*  
FERIT Osijek  
[dfischer1938@gmail.com](mailto:dfischer1938@gmail.com)

## APROKSIMATIVNA TRISEKCIJA KUTA RAČUNALNOM GRAFIKOM

**Sažetak:** Prema ideji Z. B. Šonca za aproksimativnu trisekciju kuta konstrukcijom ravnalom i šestarom u radu je to prikazano pomoću računalne grafiku programskog jezika Python. Konstrukcija ima dva koraka: u prvom se iterativno povećava kut za četvrtinu vrijednosti kuta iz prethodne iteracija. Počinje se s četvrtinom zadanog kuta. Udrugom koraku se iterativno smanjuje kut počevši od polovice svoje vrijednosti. U oba koraka iterativni postupak teži vrijednosti jedne trećine. Računa se i numerička vrijednost trećine kuta koja pokazuje efikasnost ove približne grafičke metode.

**Ključne riječi:** Trisekcija, kut, konstrukcija, računalna grafika, Python programski jezik

### Uvod

Na 8. simpoziju PIFT 2019 Z. B. Šonc prikazao je učinkoviti način približne konstrukcije dijeljenja kuta na tri dijela [1]. Taj problem poznat iz antičkih vremena kao trisekcija kuta nije rješiv tehnikom šestara i računala [3]. Uzastopnim dijeljenjem kuta na četiri dijela dobiva se vrijednost koja konvergira trećini početno zadanog kuta. Pomoću računalne grafike uočava se da ovaj postupak vrlo brzo konvertira i već



nakon tri iteracije dobiva se rješenje s vrlo malenom greškom.

## 1. Načelo postupka

Zbroj beskonačnog geometrijskog niza s koeficijentom  $q < 1$  iznosi [2]

$$S_n = \frac{a_1}{1-q} \quad (1)$$

gdje je  $a_1$  početni član niza. Za  $a_1 = 1/4$  i  $q = 1/4$  iz formule (1) dobiva se

$$S_{n1} = \frac{1}{3} \quad (2)$$

Analogno ovome, ako se odabere  $a_1 = 1/2$  i opet  $q = 1/4$ , iz formule (1) se dobiva

$$S_{n2} = \frac{2}{3} \quad (3)$$

Koristeći ove činjenice, to jest mogućnost dobivanja jedne trećine i dvije trećine neke početno zadane vrijednosti iz beskonačnog reda, može se konstrukcijom dobiti približna vrijednost trećine početne vrijednosti s konačnim ali dovoljno velikim brojem članova reda.

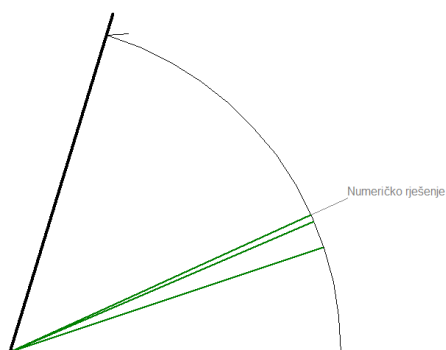
Z. Bobić Šonc [1] predložio je konstrukciju približnog dijeljenja kruga u dva koraka. U prvom koraku se u postojećem zadanom kutu konstruira četvrtina zadanog kuta. Na tako dobiveni kut doda se četvrtina tako dobivenog novoga kuta. Ponavljanjem ovog postupka dolazi se do kuta koji je približno jednak trećini zadanog kuta.

U drugom se koraku od zadanog kuta najprije odbije polovina kuta. Od tako dobivenog kuta ponovo se iterativno odbijaju četvrtine tako dobivenog novog kuta. Ponavljanjem ovog postupka dolazi se do kuta koji je približno jednak zadanom kutu umanjenom za dvije trećine. Kada se ta konstrukcija prikaže grafički, već se nakon tri iteracije poklope rješenja iz prvog i drugog koraka.

### 1.1 Konstrukcija dodavanjem

Iz Slike 1, koja prikazuje računalnom grafikom dobiven prikaz prema opisanoj metodi dodavanja u prvom koraku, vide se rezultati dobiveni nakon prve, druge i treće iteracije. U prvoj iteraciji zadani kut podijeljen je na četvrtinu. Tako dobiveni kut je u idućoj iteraciji ponovo podijeljen na četiri dijela i dodan prethodnom kutu. Ove se iteracije mogu proizvoljno mnogo puta ponavljati da bi se dosegla željena točnost. Iz slike je vidljivo, da se već kut dobiven u trećoj iteraciji podudara s numerički

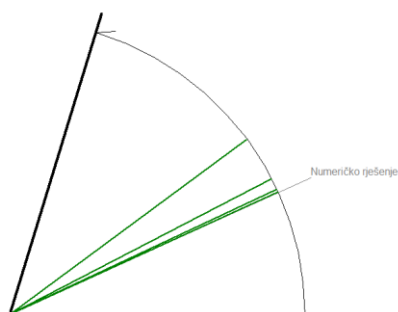
napravljenim rješenje.



Sl. 1.: Rezultati nakon tri iteracije dodavanjem

## 1.2 Konstrukcija odbijanjem

Slika 2 prikazuje računalnom grafikom dobiven prikaz prema opisanoj metodi odbijanja. U tom, drugom koraku, vide se rezultati dobiveni nakon prve, druge i treće iteracije. Početno, u prvoj iteraciji, zadani kut podijeljen je na dva dijela. Nakon toga se od tog kuta odbije četvrtina toga kuta.



Sl. 2.: Rezultati nakon tri iteracije odbijanjem

Taj se postupak iterativno nastavlja pa kut koji se tim postupkom dobiva konvergira vrijednosti od jedne trećine zadanog kuta. Slika 2 prikazuje slučaj

kada su provedene samo tri iteracije. Vidljivo je da je ova konvergencija vrlo brza i da se već nakon treće iteracije dobiva kut na kojem se ne primjećuje da se razlikuje od stvarnog rješenja, koje je za ovoj prikaz izračunat numerički.

## Zaključak

Trisekciju kuta tj. podjelu bilo kojeg kuta na tri jednaka dijela nemoguće je provesti konstrukcijom uz upotrebu samo šestara i ravnala. Postoje mnoge aproksimativne metode kojima se to može provesti. Jednu od njih pronašao je Z. Bobić Šonc [1]. U ovom radu rekonstruiran je njegov postupak upotrebom računalne grafike pomoću koje se bolje uočava brzina konvergencija ovog aproksimativnog postupka. Rezultati prikazani računalnom grafikom pokazuju da se već nakon tri iteracije dobiva crtež na kojem se aproksimativno rješenje vizualno poklapa s točnim rješenjem koje je dobiveno numeričkim putem. Ova bi se metoda mogla poopćiti na podjelu kuta na bilo koji broj jednakih dijelova. To u ovom radu nije prikazano već će biti predmet naknadnih istraživanja.

## Zahvala

Autor se zahvaljuje gospodinu Zoranu Bobiću Šoncu za poticaj da se napravi ovaj rad. Također mu se zahvaljuje na davanju kopije svog rada što mu je znatno olakšalo razumijevanje njegovog postupka.

## Literatura

- [1] Z. Bobić Šonc: Trisekcija i polisekcija gonusa šestarom i ravnalom, *PIFT 2019, Povijest i filozofija tehnike*, Zagreb, Hrvatska 2019
- [2] B. Dakić, N. Elezović: Matematika u 24 lekcije; Element, Zagreb 2010: 325
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Angle\\_trisection](https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_trisection). Pristupljeno 10. 12. 2022.

**Summary:** Following the idea of Z. B. Šonc for constructing a trisection of an angle using only a compass and ruler (CAR method) this construction is presented using Python programming language graphic facilities. The construction is made in two iterative steps: first, beginning with a quarter of a given angle, it is increased by a quarter of its previous value. Second: beginning with the half of given angle, it is decreased by a quarter of its previous value Both steps result in an approximation of a third of given angle. Comparison of graphically obtained results with numerical values proves the efficiency of this

method.

**Keywords:** Trisecting, angle, construction, computer graphic, Python programming language

*Darko Fischer*



Zvonko Benčić

Branko Hanžek  
[bhanzek1@gmail.com](mailto:bhanzek1@gmail.com)

## **Pokušaj proizvodnje bakrenooksidnih električnih ventila u Tvornici Rade Končar od 1947. do 1948. godine**

**Sažetak:** U radu su opisani napori da se u tvornici *Rade Končar* (prije *Hrvatsko Siemens*) tijekom i iza 2. svjetskog rata, za potrebe pogona istosmjerne uzbude sinkronih generatora, uvedu bakrenooksidni električni ventili (otkrio Lars Olai Grondhal<sup>1</sup> 1923. godine), umjesto mehaničkih ispravljača kad još nije bilo poluvodičkih monokristalnih ventila (dioda, tranzistora i tiristora) (W. Shockley tek 1949. [9]). U to doba bili su komercijalno dobavljeni vakuumski i ionski (plinom punjeni) ventili (ventili sa žarnom katodom, živini ventili u staklenoj i čeličnoj posudi), polikristalni ventili (bakrenooksidni i selenski ventili), te elektrolitski ventili (tzv. mokri ventili), mehanički ventili i transduktori. Takvi ventili omogućavali su izgradnju samo mrežom komutiranih usmjerivača (npr. ispravljača). U članku je, što se razvoja elektrotehnike u Hrvatskoj tiče, poseban naglasak dan pionirskom radu Ljudevita Šplajta tj. njegovoj metodi za izradu pločica za suhe ispravljače izmjenične struje s bakrenim oksidulom.

**Ključne riječi:** Bakrenooksidni električni ventili, struktura bakrenooksidnog ventila, Lars Olai Grondhal, Šplajt, Plenković, Bosanac, Dolenc

### **1. Uvod - dokumenti**

#### **1.1 Intervju profesora Plenkovića**

U intervjuu koji je prof. Zlatko Plenković dao mr. sc. Marijanu Ožaniću 1996. godine [1], Plenković je rekao:

---

<sup>1</sup> Lars Olai Grondhal (1880. – 1968.), američki fizičar i kemičar

„Moja težnja da se bavim samo slabom strujom završila je s time da mi je prof. Dolenc prepustio da se bavim ispravljačima koji su imali veze sa slabom strujom. U to ratno doba nedostajalo je izvora električne energije i koristili su se dizelski agregati iz starih automobilskih motora i generatori<sup>2</sup> kojih nije bilo problem u *Siemensu* napraviti, ali je bio problem relativno komplicirani istosmjerni uzбудnik za taj generator. Tada je Dolenc našao rješenje u mehaničkom ispravljaču koji je pretvarao izmjeničnu struju u istosmjernu. Za to su mu trebali suhi ispravljači koji se nisu mogli dobiti u Europi. Počeo sam na tome raditi. Međutim karakteristike koje sam dobio nisu bile tako kvalitetne kao što su bili originalni Siemensovi ispravljači. Kasnije sam saznao da je to bilo zato jer je bio potreban veoma čisti bakar iz Čilea, koji se u ratno doba nije mogao dobiti. Tada sam napravio bakrenooksidulne ispravljače iz bakra od pokvarenih *Siemensovih* ispravljača. Nakon svršetka rata mogli su se kupiti ispravljači, pogotovo selenski, pa smo obustavili proizvodnju.“

Profesor Plenković ispričao je suautoru ovog članka Zvonku Benčiću, otprilike tim riječima, kako je za vrijeme rata izradio bakrenooksidne ispravljačke ventile. Posebno je naglasio da je bakar iz Čilea bio ključ rješenja.



Slika 1. Prof. Zlatko Plenković (Podgora, 1917. – Zagreb, 2003.)

## 1.2 Intervju akademika Tome Bosanca

U intervjuu koji je akademik Tomo Bosanac dao mr. sc. Marijanu Ožaniću 1996. godine [10], Bosanac je rekao:

„Samouzbudni sinkroni generator prvi u svijetu. To je Dolenc izmislio. Dolencovi pomoćnici bili smo Plenković i ja. Plenković ne može biti na miru. I on je stalno nešto izmišljao, i on je imao “posoljen mozak” kao i ja. Ja sam samouzbudni generator dotjerivao teoretski. Dolenc nije podnosio matematiku uopće, a meni je matematika bila šala. Trebalo je napraviti i diode. Ja sam napravio prve diode od bakrenog oksidula, a Plenković je napravio selenske. To je u svijetu bilo sasvim novo. Bolje su selenske i tad je Plenković počeo raditi na ispravljačima

---

<sup>2</sup> Radi se o izmjeničnim generatorima. (op. autora)

i on je ostao na tome, a ja nisam. Poslije je prof. Dolencu glavni pomoćnik na samouzbudnim generatorima bio pokojni dr. Božidar Frančić, koji je na tome i doktorirao.“



Intervju Bosanca u jednom je detalju kontradiktoran intervjuu Plenkovića. Bosanac kaže da je izradio bakrenooksidulne diode, a da je Plenković bio zadužen za razvoj selenskih dioda. Po svojoj prilici bakrenooksidulne diode razvijali su zajednički.

Slika 2.: Akademik Tomo Bosanac (Bjelovar, 1918. – Zagreb, 2003.)

### 1.3 Iz prijave Ljudevita Šplajta za nastavnika fizike na Tehničkom fakultetu

U prijavi za radno mjesto nastavnika fizike na Tehničkom fakultetu u Zagrebu od 28. svibnja 1949. godine Šplajt je napisao (ispravljeni su samo tipfeleri) [2]:

„Koncem rujna 1947. premješten sam u tvornicu električnih strojeva *Rade Končar* u Zagrebu. U laboratoriju tvornice bilo mi stavljeno u dužnost, da izradim metodu za izrađivanje pločica za suhe ispravljače izmjenične struje s bakrenim oksidulom. Taj posao dovršio sam s potpunim uspjehom i za taj rad dobio sam od uprave tvornice 1948 prvo majsku nagradu. Cijeli rezultat tog istraživanja s teoretske i praktične strane opisao sam i naveo točne podatke i metode izrađivanje tih pločica. Rukopis se nalazi u tvornici *Rade Končar*.

Nakon toga sam dobio nalog da dadem izraditi sav potreban alat i naprave koje su potrebne za serijsku fabrikaciju tih pločica za suhe ispravljače. Od glavne direkcije za Elektro industriju došao je nalog da će se te pločice izrađivati u drugoj tvornici, a ja sam premješten kao profesor na Tehničku školu industrijskog smjera, kemijsko-tehnološki odjel, gdje je bio potreban profesor fizike. Na tom zvanju nalazim se i danas.“



Slika 3. Ljudevit Šplajt sa suprugom



Slika 4. Nastavnici i suradnici Kemičko-inženjerskog odjela 1930. Slijeva nadesno u prvomu redu Karlo Weber, **Ljudevit Šplajt**, Ivan Plotnikov, Gilbert Flumiani, Matija Krajčinović; u drugomu redu Ljudevit Gutschy, J. Verlić (?), Ivan Marek, Vjera Marjanović, ?; u trećem redu Vladimir Njegovan, Vladimir Kostjejev, Franjo Hanamann, Rikard Podhorsky, Bogdan Šolaja, [8]



#### 1.4 O mogućem poznanstvu Plenkovića, Bosanca i Šplajta

Kad je Šplajt došao u *Končar*, u *Končaru* su već radili Plenković (od 1942.) i Bosanac (od 1943.). U trenutku njegovog zaposlenja direktor *Končara* bio je Franjo Šafarik<sup>3</sup>. Vjerojatno su Šplajta doveli u *Končar* Plenković ili Bosanac u rujnu 1947. godine s namjerom razvoja bakrenooksidnih ventila. Šplajt je radio u *Končaru* vjerojatno do školske godine 1948./49., kad je premješten na Tehničku školu u Zagrebu za profesora fizike.

Istodobno, nakon Drugog svjetskog rata, Plenković je radio na razvoju selenskih dioda. Tada je u *Končaru* bilo dosta njemačkih ratnih zarobljenika, a jedan od njih poznao je proizvodnju selenskih ventila. Inženjer Plenković nagovorio ga je da zajedno izrade projekt proizvodnje selenskih ventila. Kad su projekti bili gotovi (1946./47.), tadašnji ministar industrije Boris Kidrič, sukladno direktivi Glavne direkcije savezne elektroindustrije donio je odluku da se istraživanje i proizvodnja selenskih ispravljača preseli u Sloveniju, u tvornicu Iskra u Kranju (*Končar* je poslije kupovao selenske ispravljače od Iskre!). Tom direktivom u Kranj je premještena i proizvodnja telefona (u *Končaru* je proizvedeno više tisuća primjeraka pod vodstvom inženjera Vladimira Jurjevića).<sup>4</sup> [11]. Prisilno preseljenje proizvodnje i ljudi u Kranj, možda su potaknuli Šplajta da potraži drugo radno mjesto u Zagrebu.

---

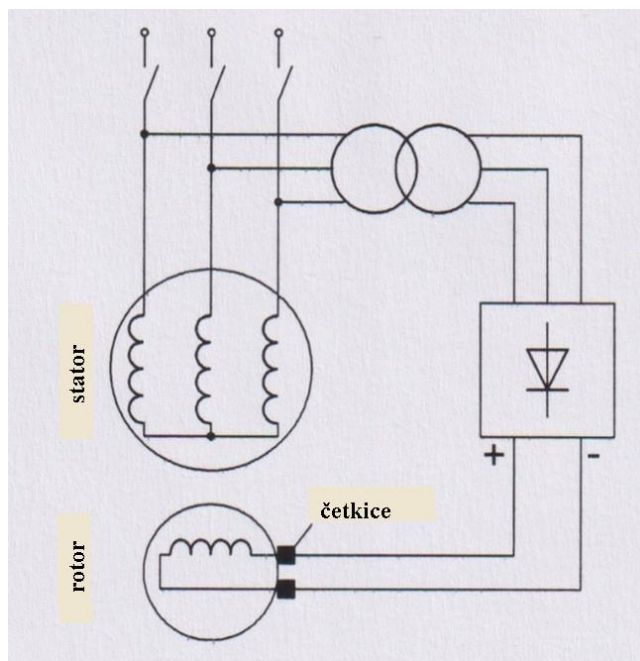
<sup>3</sup> Nakon Drugog svjetskog rata, tvornica *Hrvatsko Siemens* ušla je u poduzeće ELIH (Elektroindustrija Hrvatske) i promijenila naziv u Pogon *Rade Končar*. Profesor Dolenc je povučen u direkciju ELIH-a, a Plenkoviću je prepustio da vodi Pogon *Rade Končar*. ELIH je osnovan Uredbom Vlade Narodne Republike Hrvatske od 16. listopada 1945. U sklop ELIH-a, ušle su još elektrotehnička poduzeća AEG, Elka, Noris, Kontakt, Munja i Pasp Croatia. Pet mjeseci<sup>3</sup> kasnije Plenković je smijenjen. Umjesto njega, u veljači 1946. godine (kazivanje Plenkovića) za upravitelja Pogona *Rade Končar* postavljen je inženjer Tomo Bosanac. Bio je upravitelj do 15. listopada 1946. godine. Bosanca je zamijenio ing. Vojno Kundić, a već nakon mjesec i pol dolazi ing. Aleksa Steiner koji ostaje na dužnosti samo četiri mjeseca, zatim dolazi Franjo Šafarik koji ostaje petnaest mjeseci, pa Bora Petrov koji ostaje također petnaest mjeseci, te konačno 1. rujna 1949. ing. Vinko Vrbka. [10]

<sup>4</sup> Akademik Vojislav Bego kaže: „Kad se to razmahalo, 1947., nakon toliko uloženog truda došao je nalog od Kidriča da to ide s ljudima, nacrtima, strojevima i alatima u Kranj. I tako je telefonija nestala iz *Končara*. Otišlo je dosta ljudi. Neki su se izvukli i ostali u *Končaru*, a neki su otišli na Poštu. I od te grupe nastala je Tvornica *Nikola Tesla*.“

## 2 Načelno rješenje napajanja uzbude generatora

Iz intervjua koji je Plenković dao Ožaniću može se zaključiti da su se u tvornici *Hrvatsko Siemens* tijekom Drugog svjetskog rata sastavljali agregati za pričuveno napajanje izmjeničnim naponom. Agregati su se sastavljali od automobilskih dizelskih motora i Siemensovih izmjeničnih generatora.

Problem je bio, kako govori Plenković, komplicirani istosmjerni uzбудnik izmjeničnog generatora. Dolenc, tada direktor tvornice *Hrvatsko Siemens*, smislio je mehanički kontakti uzbudnik s bakrenooksidnim ventilima (tijekom Drugog svjetskog rata u Njemačkoj su se proizvodili mehanički ispravljači, čak do nekoliko desetaka tisuća ampera [12]). Očito radilo se o samouzbudnom generatoru, ali autorima ovog članka nije jasno čemu su onda služili bakrenooksidni ventili.



Slika 5. Načelna shema napajanja uzbude samouzbudnog generatora

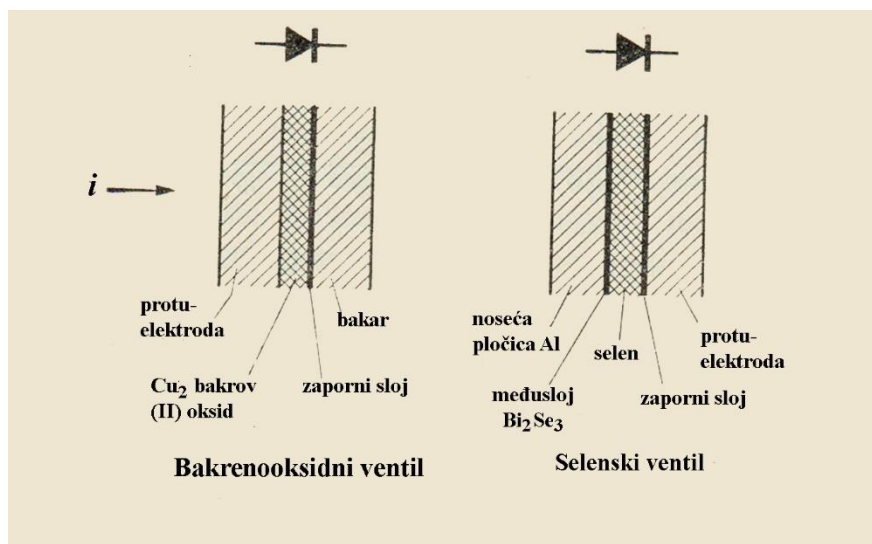
### 3 Načelna struktura i proces izrade bakrenooksidnih električnih ventila



Slola 6. Ispravljač s bakrenooksidnim ventilima tvrtke General Electric tipa 6RC3B21. Očito se radi o dvofaznom ispravljaču sa srednjom točkom (tzv. nultočkom). Srednji priključak je u sredini, a dva krajnja priključka su fazni priključci. U svakoj grani je devet ventila spojenih u seriju.

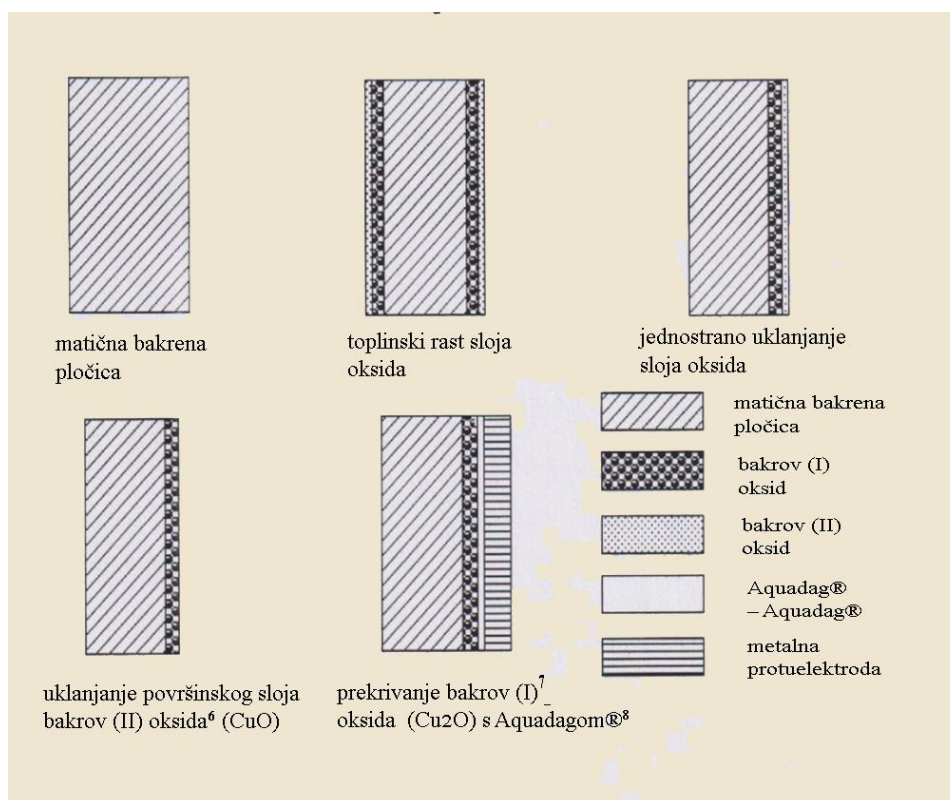
#### 3.1 Načelna struktura

Bakrenooksidni ventil otkrio je Von Lars Olai Grondhal 1923. godine [3], slika 7. Zaporni sloj je između matične bakrene pločice i bakrenooksidnog sloja. Materijal protuelektrode može biti grafit, olovo, nikal ili srebro.



Slika 7. Usporedba slojevite strukture pločica bakrenooksidnog i selenskog električnog ventila

### 3.2 Proces izrade



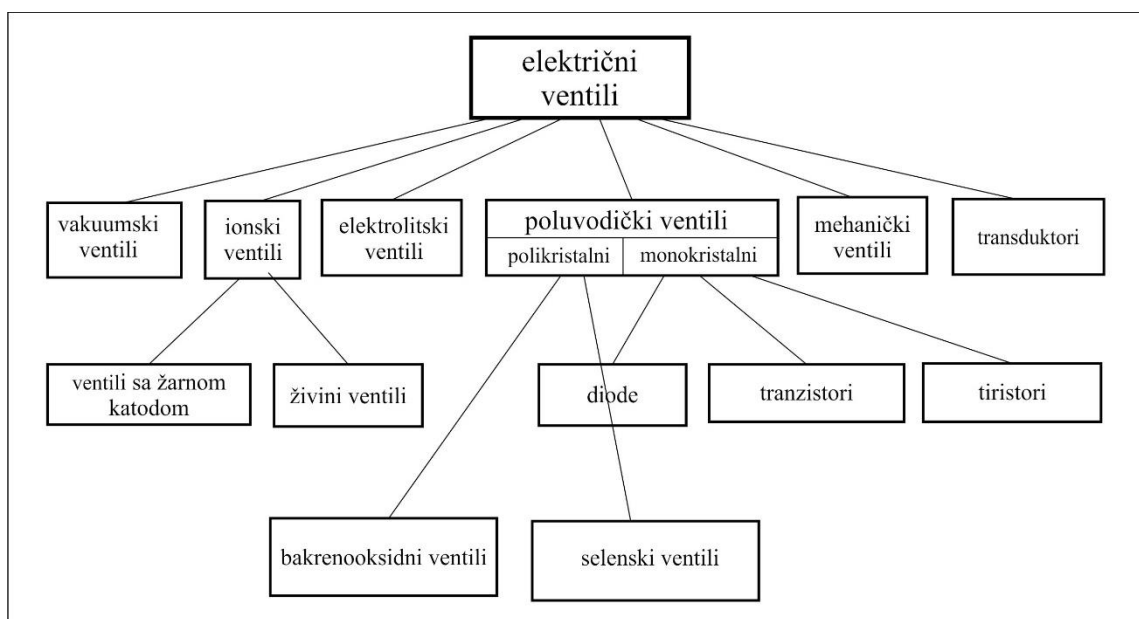
Slika 8. Faze izrade bakrenooksidnog ventila

Ukratko: Proizvodni proces bakrenooksidnih ventila je sljedeći: Čileanski bakar (bakar posebne kvalitete) se oksidira pri približno  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatim se na temperaturi od približno  $500$

°C stvara suvišak kisika čime se dobiva potrebna vodljivost bakrenooksidnog sloja. Konačno, naglim hlađenjem „zamrzne“ se stanje ravnoteže kakvo je bilo na 500 °C.

#### 4 Opravdanost odluke o razvoju bakrenooksidnih ventila u poduzeću *Rade Končar*

Ljudevit Šplajt došao je u Tvornicu *Rade Končar* koncem rujna 1947. godine. U to doba bili su komercijalno dobavljeni vakuumski i ionski (plinom punjeni) ventili (ventili sa žarnom katodom, živini ventili u staklenoj i čeličnoj posudi), polikristalni ventili (bakrenooksidni i selenski ventili), te elektrolitski ventili (tzv. mokri ventili), mehanički ventili i transduktori. Takvi ventili omogućavali su izgradnju samo mrežom komutiranih usmjerivača (npr. ispravljača). Poluvodičkih monokristalnih ventila (dioda, tranzistora i tiristora) još nije bilo, njihovo je doba započelo 1949. godine objavljivanjem rada W. Shockley-a [9].



Slika 9.: Razredba električnih ventila

U sustavima uzbude samouzbudnih generatora, od svih tada poznatih ventila, bili su tehnički prihvatljivi samo bakrenooksidni i selenski ventili. Vakuumski i ionski ventili trebaju posebni izvor za tzv. grijanje žarne katode, živini ventili trebaju poseban sustav za tzv. paljenje električnog luka, a elektrolitski ventili su nezgodni jer sadrže elektrolit (elektrolitski ventili su tzv. „mokri“ ventili).

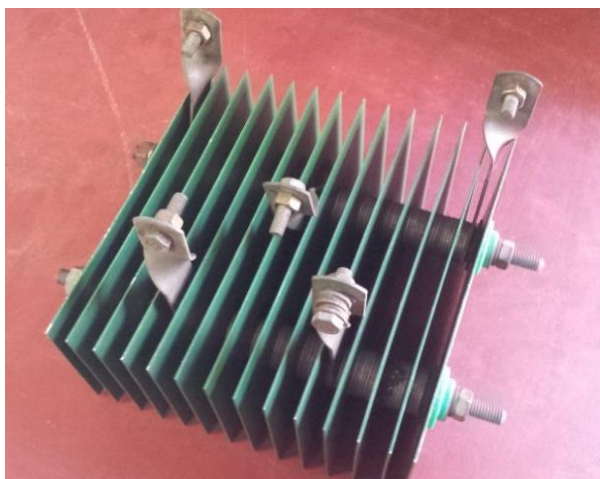
Bakrenooksidni i selenski ventili odlikuju se malim padom napona u stanju vođenja (oko jednog volta). Velika prednost bakrenooksidnih ventila prema selenskim je u tome što s

vremenom ne gube zaporna svojstva. Selenske ventile nakon dužeg strujnog opterećenja ili dužeg stajanja treba nanovo formirati, tj. naponski ih postupno opterećivati.

Zato je odluka o razvoju bakrenooksidnih ventila bila logična. Ali nije bilo logično da tvornica, čiji su osnovni proizvodi rotacijski strojevi i transformatori, proizvodi *slabostrujne* komponente.

Tablica 1.: Usporedba tipičnih karakteristika bakrenooksidnih i selenskih električnih ventila [3]

| Nazivni podaci                                         | Bakrenooksidni ventil | Selenski ventil |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| zaporni napon, vršna vrijednost, V                     | 8                     | 25              |
| zaporna struja, srednja vrijednost, mA/cm <sup>2</sup> | 0,1                   | 0,3             |
| propusna struja, srednja vrijednost, A/cm <sup>2</sup> | 0,075                 | 0,1             |
| napon vođenja, maksimalna vrijednost, V                | 0,6                   | 1,2             |
| pogonska temperatura, granična vrijednost, °C          | 55                    | 75              |



Slika 10. Selenski ispravljač tvrtke ISKRA. Očito se radi o ispravljaču u trofaznom mosnom spoju. U sredini su tri priključka za trofaznu mrežu, a na krajevima su dva priključka za istosmjerno trošilo.

(oko 1950.) [6]

## 5 Zaključak

S današnjeg gledišta zadivljuje inženjerska hrabrost i entuzijazam s kojima smo pristupili elektrifikaciji i industrijalizaciji nakon Drugog svjetskog rata. U uvjetima ekonomske izolacije

FNRJ, politika je podržavala razvoj, govorilo se: Ono što mogu drugi, možemo i mi. No propušteno nakon Domovinskog rata ne može se nadoknaditi. Bilo bi pogrešno nastaviti tamo gdje smo stali prije 30 godina. Možda je danas nova paradigma samoodrživost života u Hrvatskoj, samoodrživost na području zdravstva, školstva, energije, poljoprivrede, informatizacije i turizma. Siguran sam da nam i danas ne nedostaje intelektualne hrabrosti i entuzijazma za postizanje novih ciljeva koji vode povećanju sigurnosti i standarda života.

---

## 6 Životopisi

### Zlatko Plenković

Rođen 28. 7. 1917. u Podgori. Školovao se u Zagrebu, gdje je i maturirao 1936. godine. Diplomirao je na Tehničkom fakultetu (Elektrostrojarski odsjek) u Zagrebu 1942. godine. Završetkom studija zaposlio se u tvornici *Hrvatsko Siemens* kao pogonski inženjer, a zatim kao konstruktor i projektant rotacijskih strojeva. Godine 1945. tvornica Hrvatsko Siemens mijenja naziv u Pogon *Rade Končar*, a Plenković postaje privremeni upravitelj (pet mjeseci) te tvornice. Od 1946. do 1948. je direktor plana *Končara*, a zatim ponovno projektant asinkronih motora do 1952. godine. Od 1952. do 1955. godine je upravitelj konstrukcijskog ureda, kada postaje pomoćnik tehničkog direktora, a 1956. tehnički direktor *Končara*. Godine 1961. izabran je za direktora Elektrotehničkog instituta *Rade Končar*, gdje ujedno neposredno rukovodi Zavodom za usmjerivače. Godine 1972. izabran je za direktora tvornice *Končar – Industrijska elektronika* (INEM). U periodu 1977. – 1982., iz zdravstvenih razloga je savjetnik za koordinaciju razvoja, licencije i kooperacije tvornice INEM, zatim odlazi u mirovinu.

Godine 1948. izabran je za nastavnika, a 1958. godine za izvanrednog profesora iz predmeta *Usmjerivači* na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu.

### Tomo Bosanac

Tomo Bosanac rođen je 1918. godine u Bjelovaru gdje je pošao gimnaziju a maturirao je u Zagrebu 1937. godine. Diplomirao je na elektrotehničkom smjeru *Tehničkog fakulteta Sveučilišta Zagreb* 1943. godine, a doktorirao na istom fakultetu 1955. godine. Nakon diplomiranja radio je kao asistent u Zavodu za elektrotehniku Tehničkog fakulteta. Nastavio je svoju karijeru u tvornici Rade Končar kao glavni konstruktor električnih strojeva, a kasnije kao direktor,



pripremio je proizvodnju sinkronih generatora za koje je razradio cjelokupnu teorijsku podlogu i potrebni proračun. Kao vrhunski stručnjak na području teorije elektromagnetskih polja i krugova, primjenjivao je svoja znanja i za projektiranje posebno složenih strojeva i uređaja koji su se u to vrijeme prvi put izrađivali u Hrvatskoj. Posebno treba istaknuti gradnju prve hidroelektrane *Mariborski otok* od 24 MVA, hidrogenerator od 120 MVA za elektranu Split, izgradnju ciklotrona u Institutu *Ruđer Bošković* u Zagrebu.

Godine 1957. izabran je za profesora u stalnom radnom odnosu na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Tu je dužnost obavljao u razdoblju do 1959. godine kada je postavljen na dužnost direktora *Instituta Ruđer Bošković*. Na *Elektrotehnički fakultet* vratio se 1965. godine u svojstvu redovitog profesora. Tijekom punih trideset i šest godina na *Elektrotehničkom fakultetu* predavao je niz kolegija: *Osnove elektrotehnike*, *Teorijska elektrotehnika*, *Teorija polja*, *Teorija elektromagnetskih polja*, *Teorija strujnih krugova*, *Konverzija energije i Stabilnost mreža*. Bio je predstojnik *Zavoda za osnove elektrotehnike i elektrotehnička mjerenja* od 1974. do 1982. godine. Projektirao je i izradio s ekipom suradnika na *Elektrotehničkom fakultetu* više uređaja za visokofrekvencijsko industrijsko grijanje.

Napisao je više stručnih i znanstvenih radova, četvera skripta i dva udžbenika. Posebno treba istaknuti njegovo životno djelo, monografiju *Teorijska elektrotehnika*, objavljenu 1973. godine. Za svoj rad i zasluge primio je niz nagrada i priznanja: Nagradu Vlade FNRJ 1949. godine, Orden rada II. reda, pa zatim I. reda, *Orden Republike sa srebrnim vijencem*, Nagradu *Hrvatskog sabora*, Nagradu *Nikola Tesla*, Nagradu grada Zagreba, Zlatnu plaketu *Josip Lončar* i Zlatnu plaketu *Narodne tehnike*.

Akademik Bosanac zaslužan je za utemeljenje i razvitak znanstvenog polja elektrotehnike i elektrotehničke industrije u Hrvatskoj.

Poveznica : <https://www.info.hazu.hr/clanovi/bosanac-tomo>

## Ljudevit Šplajt

Rođen je 28. travnja 1887. u Zagrebu. Otac Radovan bio je trgovac, a majka Ana rođena Kavić domaćica. U Zagrebu je Ljudevit Šplajt 1906. položio ispit zrelosti te se iste godine upisao na studij matematike i fizike na *Mudroslovnom fakultetu Sveučilišta Franje Josipa I.* u Zagrebu. Nakon što je odslušao sve naučne predmete, 1911., izdan mu je *apsolutorij* kojim su rektor Sveučilišta i dekan Fakulteta svjedočili da je propisno polazio nastavu iz predmeta koji su poimence nabrojani zajedno s profesorima koji su ih predavali. Od 1911. postao je namjesni učitelj na realnoj gimnaziji u Zagrebu. 1914. godine izdana je Šplajtu svjedodžba o sposobnosti učiteljskoj kojom mu je priznata sposobnost da može učiti matematiku i fiziku u svim razredima srednjih škola. Od 1920. dodijeljen je *Zavodu za fiziku i fizikalnu kemiju na Tehničkoj visokoj školi*, a 1934. obranio je disertaciju i postao doktor



tehničkih znanosti. Iste je godine imenovan honorarnim nastavnikom medicinske fizike na *Veterinarskom fakultetu* u Zagrebu. Krajem 1941. zatvoren je u logoru Stara Gradiška, odakle je pušten nakon pet mjeseci. Početkom 1943. radio je u tvornici gramofonskih ploča *Elektroton* u Zagrebu. Krajem rujna 1947. premješten je u *Tvornicu električnih strojeva Rade Končar*, u Zagrebu. Potom je premješten u Tehničku školu industrijskog smjera kao profesor fizike. Krajem svibnja 1949. iz te se škole javio na raspisani natječaj za izvanrednog profesora na katedri tehničke fizike na *Tehničkom fakultetu*. Kao što je poznato, to je mjesto dobio Vatroslav Lopašić (1911.–2003.) u ožujku 1950., što Šplajt nije dočekao jer je malo prije toga umro.

## 7 Literatura

- [1] Ožanić, Marijan: *Prof. Zlatko Plenković – osnivač Instituta*, Velikani hrvatske znanosti, <http://www.croatianhistory.net/etf/plenkovic.html> (25. 4. 2020.)
- [2] Šplajt, Ljudevit: Molba, 28. svibnja 1949.
- [3] Wasserrab, Theodor: *Schaltungslehre der Stromrichtertechnik*, Springer Verlag, 1962., XV+466 str.
- [4] Ispravljač s bakrenooksidnim ventilima tvrtke General Electric, <https://www.ebay.de/itm/General-electric-copper-oxide-rectifier-6RC3B21-Item-2-/382900386080> (25. 4. 2020.)
- [5] Cuff, Thomas Mark: The copper oxide rectifier, [https://www.researchgate.net/publication/294259463\\_The\\_Copper\\_Oxide\\_Rectifier](https://www.researchgate.net/publication/294259463_The_Copper_Oxide_Rectifier) (25. 4. 2020.)
- [6] Selenski ispravljač u trofaznom mosnom spoju, ISKRA <https://www.google.com/search?q=selenski+ispravljac> (26. 04. 2020.)
- [7] Benčić, Zvonko, Plenković, Zlatko: *Energetska elektronika, I. dio Poluvodički ventili*, sveučilišni udžbenik, Školska knjiga, Zagreb, 1978., XVI+408 str.
- [8] Vjera Kaštelan-Macan, *Vjera Marjanović-Krajočan*, edicija Istaknuti profesori, knjiga 12, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb., 2018., 140 str. [https://www.fkit.unizg.hr/images/50012395/Vjera\\_Marjanovic-Krajočan.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/images/50012395/Vjera_Marjanovic-Krajočan.pdf) (27. 4. 2020.)
- [9] Shockley, William, Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 28, Issue 3, July 1949., pp. 435-489.
- [10] Car, Stjepan, 50 godina primijenjenih znanstvenih istraživanja i razvoja na području elektrotehnike, KONČAR – Institut za elektrotehniku, srpanj 2011., Zagreb, 398 str.
- [11] Benčić, Zvonko, *Na rubnici moje učinske elektronike*, Kiklos, Zagreb, 2018., 346 stranica

- [12] Rolf, Erich, *Der Kontaktumformer; Aufbau, Wirkungsweise, Berechnung, Betrieb*, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1957., 550 str.
- [13] Spomenica 1919. – 1969., 50 godina studija elektrotehnike u Hrvatskoj, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969., 200. str.
- [14] Spomenica 1956. – 1996., 40. obljetnica Fakulteta elektrotehnike i računarstva, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Element, Zagreb, 1996.
- [15] Hanžek, Branko: *Plotnikovljeva zabluda – poticaj internacionalizaciji hrvatske znanosti s Tehničkog fakulteta*, Rad HAZU, Tehničke znanosti 16, knjiga 518, 2014., str. 17 i str. 30, (<https://hrcak.srce.hr/139374>)

#### Autori

Prof. dr. sc. Zvonko Benčić

Dr. sc. Branko Hanžek

#### Dopuna i uređenje

mr. sc. Ernst Mihalek, [emihalek2@gmail.com](mailto:emihalek2@gmail.com)



Davorin Brkić

davorin.brkic@hotmail.com

## **Međudržavne, međurepubličke i međupodručne razmjene električne energije do 1990. u hrvatskome kontekstu**

**Sažetak:** Rad prikazuje objedinjeni pregled raspoloživih povijesnih tragova koji govore o naslovnim razmjenama električne energije u Hrvatskoj (i u ostatku Europe) u smislu: potencijala razmjena (potrošačke i proizvodne točke u prostoru), infrastrukturi potrebnoj za prijenos električne energije (dalekovodi), ostvarenim razmjenama (međurepubličke, međudržavne) i načinu nadoknade vrijednosti razmjena (npr. energija za energiju, energija za novac, investicija u elektranu za energiju). Tijekom pregleda objavljenih radova koji se tiču hrvatske elektroenergetike, nije pronađena sinteza koja bi govorila o međurepubličkim ili međudržavnim sporazumima o razmjenama električne energije u kontekstu hrvatskoga elektroenergetskoga sustava do 1990., u smislu nadoknade vrijednosti razmjena. Na temelju povijesnih tragova prikazan je narativ o naslovnoj temi koji je u skladu s izloženim izvorima. O tehnološkim rješenjima koja su omogućavala šire i redovne međurepubličke i međudržavne razmjene u hrvatskom kontekstu, pokazalo se, ima smisla govoriti od sredine 70tih godina XX. stoljeća, stoga je prikaz izvora o razmjenama usredotočen na to razdoblje, dok su povijesni tragovi o ranijim razmjenama rubno prikazani. Ocrtan je tijek izgradnje infrastrukturnih energetske objekata, ne samo na hrvatskom tlu i glede veza s drugim sustavima, nego i šire, a u smislu infrastrukture koja je potrebna za razmjenu. Posebno je obrađen primjer povezivanja Dalmacije s ostatkom Hrvatske, gdje je pokazano da

uspostava razmjena električne energije između udaljenih područja nije bila samo tehničko-ekonomsko pitanje. Pokazalo se da je za razumijevanje procesa u hrvatskome sustavu potrebno pozabaviti se ne samo jugoslavenskim kontekstom nego i širim europskim, pa i svjetskim. Uveden je pojam *nesusjedna razmjena*, da bi se označio utjecaj drugog elektroenergetskog sustava na elektroenergetsku bilancu promatranog sustava preko granica trećih sustava, kod primjera koji se u radu iznose.

**Ključne riječi:** elektroprivreda, elektroenergetski sustav, električna energija, tržište električne energije

## 1. Uvod

Vincent Christiaan Lagendijk (r. 1980.) je u doktorskoj disertaciji iz 2008. naziva *Electrifying Europe : the power of Europe in the construction of electricity networks*, u kontekstu elektroenergetskog povezivanja, opisao: razvoj ideja (npr. utjecaj poimanja europskog identiteta na elektroenergetsko povezivanje), važne događaje (npr. prijenos električne energije od Francuske preko Švicarske do Italije 1921. – *neizravna razmjena*), ocrtao geostrateške čimbenike (npr. *phase of détente*<sup>1</sup>), motive za uspostavu širih razmjena električne energije (npr. iskorištavanje neuskладиštivih viškova hidroenergije iz hidroelektrana, npr. *load factor*<sup>2</sup>, *economic mix*<sup>3</sup>), doprinos značajnika (npr. Oskar Oliven), utjecaj nevladinih organizacija na izgradnju mreže (npr. otpori prilikom izgradnje dalekovoda<sup>4</sup>), ulogu europskih organizacija u kontekstu izgradnje europskoga elektroenergetskog sustava (npr. UNECE-a), utjecaj europskih integracijskih procesa u političkom smislu (npr. institucije prethodnica Europske unije) i u tehnološkom smislu (npr. *hidden integration*<sup>5</sup>) te posebne poslovne subjekte koji su bili u stanju graditi i voditi složene

---

<sup>1</sup> Razdoblje otopljenja odnosa između SAD-a i SSSR-a od 1967. do 1979., <https://www.britannica.com/topic/detente>, pristup 31. 5. 2023.

<sup>2</sup> *Load factor* mjera je učinkovitosti koja se odnosi na korištenje elektroopreme [1, str. 21.], a mogla bi podrazumijevati korist od toga što termoelektre rade na većim snagama i time postižu veću učinkovitost pretvorbe energenta (npr. prirodnog plina) u električnu energiju.

<sup>3</sup> *Economic mix* odnosi se na optimalni složaj različitih izvora za proizvodnju električne energije, kako bi se stvorile ekonomske koristi i povećala veća pouzdanost rada sustava [1, str. 21.].

<sup>4</sup> »Another issue for the sector was the increased awareness of environmental pollution and societal opposition to new projects in general, resulting in “painfully slow approval procedures, sharpened environmental regulations, and drastic price hikes [making] the construction of new generation units and expansion of the transmission network increasingly more difficult« [1, str. 190.].

<sup>5</sup> *Hidden integration* je koncept kojeg je uveo Johan Schot 2008., a odnosi se na zanemarivanje tehnološkog razvoja u povijesnim analizama, kao i na ekspliciranu strategiju inženjera koji su raspravu o elektroenergetskom povezivanju

elektroenergetske sustave (*Unternehmergeschäfte*) uvažavajući da je elektroenergetski sustav sociološko-tehnički sustav (*socio-technical system*) koji osim tehnoloških sastavnica obuhvaća i institucionalne, organizacijske, legislativne sastavnice kao i nacionalne resurse. Navedeni tijekom razvoja utjecao je na mogućnosti razvoja hrvatskoga elektroenergetskoga sustava (npr. utjecaj dvaju velesila u *Hladnom ratu*<sup>6</sup> na povezivanje Jugoslavije sa zapadnim UCPTE-om i s istočnim CDU VERE-om<sup>7</sup> [1, str. 184.-90.]<sup>8</sup>). Prema tome ta doktorska disertacija nezaobilazan je sadržaj od kojega valja krenuti želi li se produbiti spoznaju o naslovnoj temi.

Ovaj rad, nadovezujući se na navedenu doktorsku disertaciju, na temelju novouvedenih triju svjedočanstava o razmjenama električne energije od sredine 70-tih godina XX. stoljeća (Marko Lovrić, Mićo Klepo, Ivica Toljan<sup>9</sup>, u prilogu ovoga rada), izvještaja u tiskovinama (*Večernji list*, *Slobodna Dalmacija*), na temelju zapisa o tim razmjenama u časopisu *Energija* kao i u drugim izvorima (ne i radom u arhivima), rasvjetljuje tehnološku povijest razmjena električne energije, pritom se usredotočujući više na hrvatsku perspektivu jer, razumije se, predmetna doktorska disertacija nije se mogla posvetiti pojedinim teritorijima, a tako ni na hrvatsko tlo.

Osim što su radovi o povijesti hrvatske elektroprivrede bogati u svojem opsegu, a postoji i sinteza koja daje kronološki pregled bitnih činjenica za cjelokupni hrvatski teritorij u promatranome razdoblju (Josip Moser, *Pregled razvoja elektroprivredne djelatnosti u Hrvatskoj 1875. – 2000.*), njihovu društvenu vrijednost povećava i količina digitaliziranih materijala koji su dostupni istraživačima (npr. [22], [23]). Osim toga *Večernji list* i *Slobodna Dalmacija* podigli su svoje arhive u internetski svijet u kojemu se ista može jednostavno pretraživati (pretraga teksta), čime su vrijedni i lakše dostupni prinosi za povijest elektroenergetike pristupačni bez poteškoća ([24], [25]). Kao dopunski materijal poslužile su digitalizirane i dostupne sinteze drugih država u okruženju, kao i europske publikacije, na engleskome jeziku.

---

Europe učinili prestručnom (*technify*) kako bi što je više moguće umanjili utjecaj političkih dionika, kao i ljudi koji nisu iz struke, na povezivanje europskih elektroenergetskih sustava [1, str. 19.-20.].

<sup>6</sup> *Hladni rat* razdoblje je međunarodnih odnosa od kraja 1940-ih do početka 1990-ih, obilježeno međusobnim suprotstavljanjem i nadmetanjem SAD-a i SSSR-a te njihovih saveznika u globalnim geopolitičkim, gospodarskim i drugim odnosima, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=25798>, pristup 26. 5. 2023.

<sup>7</sup> CDU VERE (*Centralnoje Diszpetcserszkoje Upravlénijje villamosenergia-rendszerek egyesülése* [19, str. 49.]). Koristi se i kratica OES SEV, *Energija*, god. 38 (1989), 2, 135-143.

<sup>8</sup> Zapadni su vojni saveznici 1944. u Moskvi dogovorili podjelu utjecaja u Jugoslaviji između SSSR-a i zapada u omjeru 50:50, a na konferenciji u Potsdamu 1945. godine Britanci su utvrdili da raniji dogovor za Jugoslaviju očito ne vrijedi jer je utjecaj SSSR-a u Jugoslaviji bio 90%, Igor Ivašković (2022.), »Motivi jugoslavensko-bugarskog povezivanja potkraj 2. svjetskog rata i u poraću«, *Društvena istraživanja : časopis za opća društvena pitanja*, Vol. 31 No. 3, 2022., str. 552. i 528.

<sup>9</sup> Trima kolegama se i na ovaj način zahvaljujem.

## 2. Elektroenergetska infrastruktura kao preduvjet za naslovne razmjene

Višefazni trofazni prijenos električne energije (Oskar von Miller r. 1855., Mikhail Dolivo–Dobrovolsky r. 1862., Charles Lancelot Brown r. 1863.)<sup>10</sup>, kojemu su prethodile Franklinova prva potpuna paradigma za elektricitet iz XVIII. stoljeća i Maxwellova elektromagnetska teorija iz sredine XIX. stoljeća<sup>11</sup>, Ferrarisov jednofazni prijenos električne energije 1884. (40 km), kao i lavina tehničkih patenata nakon predavanja Nikole Tesle iz 1888. [7, str. 22.], osim toga i teorijski doprinosi (npr. Steinmetzovo objašnjenje rada transformatora iz 1888., Ferrarisovo objašnjenje rada rotirajućih polja iz 1888.<sup>12</sup>), izveden je 1891. u Njemačkoj<sup>13</sup>, odrazio se na odabrano rješenje za američki prijenos od hidroelektrane *HE Niagara Falls* [7], a imao je odjeka u Hrvatskoj. Između 1892. i 1893. pušteno je trinaest komercijalnih trofaznih sustava u pogon, od čega jedan u Rusiji a ostali u Europi i SAD-u [12]. Prije 1891. se u svijetu, a prethodno 1895. godini u Hrvatskoj, ne može u modernom smislu govoriti o prijenosu električne energije, ni između država ni između udaljenijih područja unutar države. Prema tome se zanemaruje razvoj elektroenergetike u prethodnome razdoblju (npr. Voltina baterija 1799., Ørstedovo pretvaranje električne energije u mehanički rad 1820. zatim Faradayova obratna pretvorba 1831., Edisonova komercijalna elektrana 1881., izum spojnika/pretvarača za izmjenično/istosmjernu pretvorbu kojeg je 1888. izumio Charles S. Bradley itd. [12]).

Godine 1951. postojala su u Hrvatskoj četiri elektroenergetska sustava (sjeverozapadna Hrvatska; Istra, Hrvatsko primorje i Gorski kotar; Dalmacija; Slavonija) i niz posve izoliranih gradova odnosno područja (npr. Dubrovnik, Slavonski Brod, Gospić itd.). Iako, sustav sjeverozapadne Hrvatske i istarski sustav nisu bili posve neovisni jer su bili vezani preko Slovenije, a budući da su imali usko grlo u prijenosu treba ih smatrati posebnim sustavima [7, str. 101.-4.]. U razdoblju od 1946. do 1951. u Slavoniji su potrošnja i proizvodnja bile jednake, u Dalmaciji je potrošnja bila neznatno veća od proizvodnje, dok je u sjeverozapadnoj Hrvatskoj potrošnja prevladavala, a u Istri i Hrvatskom primorju je potrošnja bila znatno veća<sup>14</sup>, što, uvažavajući da se električna energija nije skladištila (npr.

---

<sup>10</sup> Vujević upozorava da je August Haselwander prvi 1888. osmislio trofazni prijenos električne energije s trofaznim sinkronim izmjeničnim strojevima, koji je imao tri fazna vodiča, i da ga je ujedno prvi konstruirao u praksi [12, str. 432.]. Kronološki pregled trinaest komercijalnih trofaznih izmjeničnih prijenosnih sustava (*Earliest Commercial Three-Phase AC Transmission Systems*) od uključivo 1892. do uključivo 1893. dan je kod Vujevića [12, str. 418.].

<sup>11</sup> Više o elektricitetu u tome surječju može se pronaći u: Thomas Samuel Kuhn (1970., 2002.). *Struktura znanstvenih revolucija*, drugo izdanje, Zagreb.

<sup>12</sup> Temeljiti prikaz razvoja u XIX. stoljeću, pa i o Ferrarisu i Steinmetzu, pogledati kod Slavka Vujevića [12].

<sup>13</sup> Hidroelektrana *HE Lauffen*, generator 230 kVA, 176 km, 42 Hz, 15 i 25 kV, učinkovitost 78,9%.

<sup>14</sup> Godišnje količine elektroenergije po četiri područja (sjeverozapadna Hrvatska; Istra i Hrvatsko primorje; Dalmacija; Slavonija) dostupne su po godinama za razdoblje od 1946. do 1951., gdje je u Slavoniji potrošnja jednaka proizvodnji, a ostala tri područja u svim godinama imala su potrošnju veću od proizvodnje (netouvoz): u Dalmaciji je proizvodnja neznatno manja od potrošnje (ispod 0,1%), u sjeverozapadnoj Hrvatskoj je proizvodnja znatno manja od potrošnje

pretvaranjem elektroenergije u potencijalnu hidroenergiju u *RHE Velebit* i kasniji prijelaz te energije u električnu energiju), govori o količosti međupodručnih i/ili međurepubličkih razmjena električne energije. U surječju s izvješćima iz 1951. bilo je napisano kako kupnja električne energije iz Slovenije i Italije bijaše znatno povoljnija nego proizvodnja u vlastitim termoelektranama, ne samo zbog cijene nego i zbog ušteda dragocjenog ugljena [7, str. 104.]. Prije 1953. nije bilo na teritoriju današnje Republike Hrvatske (dalje: Hrvatska) elektrane koja je izgrađena za elektroenergetski sustav u cjelini. Naime, sa svoja tri agregata, koji su stavljeni u pogon 1953., *HE Vinodol* bila je prva elektrana koja je izgrađena za elektroenergetski sustav u cjelini [6], kada je i Hrvatsko primorje povezano s Istrom 110 kV-tnim vodom [7, str. 113.]. Prva konfiguracija 110 kV-tnih vodova koja se u pravom smislu mogla nazvati mrežom bila je 1954. na području sjeverozapadne Hrvatske i Slovenije [6, str. 188.], a tada je zatvoren 110 kV-tni prsten na navedenom teritoriju [5, str. 91.]. Da redovne međudržavne razmjene s elektroenergetskim sustavom zapadno od *Željezne zastave*<sup>15</sup> ima smisla u Hrvatskoj gledati tek od sredine 70tih godina, pa uvelike i međurepubličke razmjene, pokazat će se u nastavku.

Izgradnja elektroenergetskih objekata, koja je preduvjet za razmjene električne energije između udaljenih područja, nije samo tehničko-ekonomsko pitanje. O tome svjedoči povijest povezivanja unutar Dalmacije kao i povijest izravnog povezivanja Dalmacije sa sjeverozapadnom Hrvatskom. Na primjeru Dalmacije može se uvjeriti o kontekstu u kojega je ukotvljena kronologija izgradnje same mreže potrebne za šire razmjene električne energije.

Dalmacija. Izgradnja prvog dvofaznog prijenosa električne energije u Hrvatskoj 1895. [6], [7, str. 95]<sup>16</sup> pošla je od uočavanje europske izvedbe višefaznog prijenosa električne energije (Njemačka 1891.), kao i ideje za izgradnju vlastitog prijenosa (protagonist je Šibenčanin Marko Šupuk r. 1856.<sup>17</sup>). Izgradnji je prethodilo pisanje o njemačkom prijenosu u hrvatskom tisku [5, str. 6.], izložba tvrtke *Siemens* o elektrifikaciji u Zagrebu 1891.<sup>18</sup> i motivirajuće predavanje Nikole Tesle (r. 1856.) u zagrebačkoj Gradskoj vijećnici 1892. (o čemu su izvijestile *Narodne novine*<sup>19</sup>). Na kraju je vlastiti

---

(potrošnja veća za iznos od 26% do 52%) a u posljednjem području potrošnja prevladava prema proizvodnji (veća za iznos od 35% do 107%) [7, str. 103.].

<sup>15</sup> *Željezna zavjesa* je politička, vojna i ideološka prepreka postavljena od strane SSSR-a nakon *Drugog svjetskog rata*, kako bi zaštitio sebe i svoje satelite od otvorenog sukobljavanja sa zapadnim i drugim nekomunističkim područjima, <https://www.britannica.com/event/Iron-Curtain>, pristup 26. 5. 2023.

<sup>16</sup> 320 kVA, 3 kV-ti, 42 Hz, 11 km, razdjelna mreža na 110 V-tnom naponu s 216 žarulja i 12 lučnih lampa.

<sup>17</sup> Gojko Lambaša, <https://sibenski.slobodnadalmacija.hr/sibenik/susur/zanimljivosti/ovo-je-prica-o-obitelji-ante-supuka-nenadmasnog-vizionara-i-graditelja-najboljeg-gradonacelnika-sibenika-svih-vremena-593925>, pristup 25. 5. 2021.

<sup>18</sup> SIEMENS (2011.). *Povijest obilježena inovacijama 125 godina Siemens u Hrvatskoj*.

<sup>19</sup> Davor Žubrić (2022.), »Nikola Tesla u gradu Zagrebu 1892.«, [http://www.croatianhistory.net/etf/tesla\\_zg.html#teslap](http://www.croatianhistory.net/etf/tesla_zg.html#teslap), pristup 25. 6. 2022., za kontekst izgradnje prvog prijenosnoga sustava pogledati u [7].

prijenos električne energije izveo Vjekoslav pl. Meichsner (r. 1847.). Bili su prisutni društveni i politički otpori daljnjem širenju toga sustava u Dalmaciji. Zadarskom gradonačelniku Trigariju bio je problem što je bilo riječ o mišljenju »hrvatskog inženjera« i što je Šibenik bio provincijalni grad. Objelodanio je bojazan obrazlažući ga time što je ideja u Europi bila nova, a i strahom od toga da Vlasi ne bi iz inata razbili dalekovod [7, str. 92.-4.].

Položaj Dalmacije oko izgradnje visokonaponskih elektroenergetskih objekata može se gledati u europskome kontekstu, tako je Oskar Oliven 1930. zamislio da kod izgradnje europske mreže, treba u Dalmaciji graditi visokonaponsku mrežu [1, str. 81.-84.], a George Viel 1929. u svojem planu europske mreže da ne treba [4, str. 8.].

Organizacija UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*, koristi se i kratica ECE), osnovana 1947., je 1952. u perspektivi vidjela Jugoslaviju kao izvoznicu hidroenergije u Austriju i Njemačku [1, str. 167.]. Uz sudjelovanje Austrije, Italije, zapadne Njemačke i Jugoslavije osnovana je 1952. komisija pod nazivom *Yougelexport* u okviru koje se hotilo graditi elektroenergetsku mrežu na teritoriju Jugoslavije, koja bi bila povezana s državama zapadno od *Željezne zavjese*<sup>20</sup>. Do realizacije 1955. nije došlo zbog »financijsko-političkih razloga«, ali su izrađene studije bile poticaj za povezivanje Dalmacije i sjeverozapadne Hrvatske. Izvedba projekta bi podrazumijevala da je Dalmacija povezana sa sjeverozapadnom Hrvatskom preko teritorija Hrvatske [9, str. 196.-97.], [5, str. 94.]. Problemi su bili u financiranju jer međunarodne banke nisu htjele dati jedan kredit za više država istovremeno, a Jugoslavija nije dozvoljavala uknjiživanje u vlasništvo objekata (u slučaju kada bi kredit za izgradnju na teritoriju Jugoslavije uzela država koja nije Jugoslavija). Zapadna Njemačka je dala kredit Jugoslaviji, koji je ona utrošila za druge svrhe tvrdeći da je novac za ratnu odštetu, što je izazvalo skandal. U konačnici su se 1959. članovi *Yougelexport*a usredotočili samo na elektranu *Lika-Gacka*. Elektranu na Trebišnjici su na kraju financirale Sjedinjene Američke Države (SAD) u okviru pomoći Jugoslaviji, a Jugoslavija je sama financirala elektranu na Cetini [1, str. 176.-7.].

Pokušaj povezivanja Italije i Dalmacije, s prekomorskim kabelom od Korčule do poluotoka Gargana, bio je 1957. i 1958. Ideja povezivanja se pokazala ekonomičnom, ali do povezivanja nije došlo jer talijanska strana nije bila spremna na sufinanciranje. Odbacivanje te mogućnosti obrazloženo je time da bi Jugoslavija kao izvoznik, potpuno ovisila o volji jednog kupca koji bi diktirao uvjete kupovanja energije [9, str. 196.-7.]. Treba u tome kontekstu pripomenuti da su zbog

---

<sup>20</sup> Izdana je knjiga na temu toga projekta koju bi valjalo pregledati: United Nations. Economic Commission for Europe (1958.). *Possibilities of electric power exchanges between the countries of central and south eastern Europe*, Ženeva, [https://librarysearch.library.utoronto.ca/discovery/fulldisplay/alma991105850812406196/01UTORONTO\\_INST:UTORONTO](https://librarysearch.library.utoronto.ca/discovery/fulldisplay/alma991105850812406196/01UTORONTO_INST:UTORONTO), pristup 12. 12. 2022.



imperijalne sastavnice jugoslavenske politike prema Italiji (Trst), odnosi dvaju država bili zatrovani sve do 1954. kada je postignut dogovor [18, str. 38.]. Vezano za navedenu ovisnost o volji jednoga kupca, zanimljiv je primjer podmorskoga kabla između Danske i Švedske, čija je prvotna svrha bila izvoz viška hidroenergije u Dansku, a kasnije je koristio i za suprotni tok energije, kada se oživotvorila razlika između pojmova planirani sustav i evolutivni sustav (*planned and evolving systems*) [1, str. 26.]. Prvi 110 kV-tni podmorski kabel u Hrvatskoj je ugrađen 1968., a povezivanje većih hrvatskih otoka s elektroenergetskom mrežom bilo je, u drugoj polovici 50-tih, na srednjonaponskoj razini [6]. Ni Grčka u hladnoratovskom razdoblju - unatoč svojim potrebama za električnom energijom koje je namirivala uvozom iz Albanije, Bugarske i Jugoslavije - nije, zbog financijskih i tehničkih prepreka, uspjela sagraditi podmorski vod prema Italiji koja joj je bila saveznica, a ni s Turskom [21, str. 158.].

Budući da je 1962. godine Dalmacija prvi puta izravno povezana sa sjeverozapadnom Hrvatskom [6], a i da je 60-tih na visokonaponskoj razini sjeverozapadna Hrvatska bila povezana sa slovenskim sustavom, od važnosti za Dalmaciju je projekt izgradnje SUDEL<sup>21</sup>-ovog prstena iz 60-tih. Prethodno je Dalmacija s Hercegovinom povezana 1927.<sup>22</sup>, a južna i srednja Dalmacija povezane su 1956. [7, str. 113.] [5, str. 95.], iste godine posredno preko Bosne i Hercegovine povezana je Dalmacija sa Slavonijom [7, str. 113.] [5, str. 95.] kada i prijenos električne energije u Hrvatskoj postaje posebna samostalna djelatnost [6, str. 19.]. Na sastanku UNECE-a 1963. su Poljska, Čehoslovačka, Austrija i Jugoslavija tražile da se istraže mogućnosti pojačanja prekograničnih vodova između država s dvije strane *Željezne zavjese* te je za to načinjen plan. Većina zapadnoeuropskih država bila je suzdržana prema tome planu, a Velika Britanija, SAD i Belgija bili su protiv. NATO-v ECONAD (*Committee of Economic Advisers*) je smatrao 1964. da bi se jačim elektroenergetskim povezivanjem zapada sa sovjetskim satelitima postigla njihova manja ovisnost o SSSR-u te da k tome cilju može služiti Jugoslavija, a i u zbilji počinje slabiti protivljenje SAD-a elektroenergetskom povezivanju s dviju strana *Željezne zavjese* [1, str. 184.-90., 211.]. SUDEL je osnovan 1964., a činile su ga u početku Jugoslavija, Italija i Austrija [7, str. 75.]. Odlučnim slovenskim koracima, a zahvaljujući dobrim kontaktima s austrijskim i talijanskim stručnjacima, došlo je do postepene prevage u većinskom jugoslavenskom mišljenju, čime je, uz podršku glavnog direktora JUGEL-a (*Jugoslavenska zajednica elektroprivrede*), uspostavljen SUDEL. Budući da su, u okviru SUDEL-a, predstavnici JUGEL-a sjedili u Ljubljani, te da su, prema statutu SUDEL-a, morali imati menadžerske uloge u svojim tvrtkama - mogli su provoditi odluke SUDEL-a u djelo. U slučaju kada je jedna od tri strane imala problema u opskrbi svojih potrošača, mogla je tražiti pomoć

---

<sup>21</sup> SUDEL - *Regional UCPTE Association of Southeastern Electric Power Systems* [14].

<sup>22</sup> Elektroprenos BIH, Povijest, <https://www.elprenos.ba/HR/IstorijaHR.aspx>, pristup 30. 7. 2019.

od druga dva člana SUDEL-a [14, str. 34.]. Izgrađen je 1970. godine SUDEL prsten na slovenskom, austrijskom i talijanskom teritoriju, a koji je započeo s pokusnim pogonom [14, str. 35.]<sup>23</sup>. SUDEL-u 1972. pristupa Grčka [9]<sup>24</sup> (u sinkronom radu s jugoslavenskim sustavom i UCPTE-om je od 1976., na 400 kV-tnoj razini 1979.<sup>25</sup>) [7, str. 75.], pa su prijenosni vodovi kroz Hrvatsku dobili veću tranzitnu važnost [5, str. 116.]. Sustav sekundarne regulacije frekvencije i snage razmjene konačno je uspostavljen u Jugoslaviji 1972. [6, str. 86.], a bio je preduvjet za sinkroni rad s UCPTE-om i imao je dvije mogućnosti rada (granice Hrvatske, granice JUGEL-a)<sup>26</sup>. Jugoslavenski sustav prvotno je radio u sinkronom pogonu s talijanskim sustavom 1974., a 1975. i s austrijskim sustavom, čime je SUDEL-prsten tada zatvoren [14, str. 18., 35.], [7, str. 75.]. Jugoslavija postaje punopravni član UCTPE-a 1987. (*“officially” a full and interconnected partner of the Western European system*) [1, str. 198.]. Prije no što je 1971. SUDEL-ovim prstenom, čiji je dio na jugoslavenskom teritoriju izgradila tvrtka *Dalekovod*, struja počela teći preko granica, između Jugoslavije te Austrije i Italije bila se razmjenjivala električna energija na 110 kV-tnoj razini, međutim ta naponska razina bila je nedovoljna. Logika iza SUDEL prstena je bila da se električna energija iz Jugoslavije u Italiju i Austriju izvozi u zimskim mjesecima, a ljeti, kada je nizak vodostaj rijeka, da energiju jugoslavenskim potrošačima daju austrijski i talijanski sustav.<sup>27</sup>

Gledano lokalno, francusko društvo *La Dalmatien* kao vlasnik *HE Kraljevac*, 1932. je godine ponudilo energiju gradu Zagrebu, a uz to su nudili da će besplatno izgraditi 100 kV-tni dalekovod do Zagreba. Ovaj je projekt propao zbog nestašice kapitala uslijed svjetske ekonomske krize [5, str. 50.-62.]. Osim toga pojavljivali su se lokalni planovi elektrifikacije. Inženjer Ž. Pecić je 1937. predložio elektrifikaciju teritorija *Kraljevine Jugoslavije*, u kojoj bi Dalmacija bila izravno preko teritorija Hrvatske povezana sa sjeverozapadnom Hrvatskom [8, str. 23.-4.]. *Ministarstvo industrije F. N. R. Jugoslavije (Glavna Uprava elektroprivrede)* izradilo je 1947.<sup>28</sup> plan elektrifikacije do 1951., gdje Dalmacija nije izravno vezana sa sjeverozapadnom Hrvatskom. Visokonaponski sustav istočnije od granice *Karlobag – Karlovac – Virovitica* nije bio predviđen za spajanje sa zapadnijim

---

<sup>23</sup> Pogledati: *Večernji list*, 18. 8. 1971. (Br. 3715., str. 2.).

<sup>24</sup> Isto se navodi i u *Energija*, god. 37 (1988) 1, 5-9.

<sup>25</sup> *Energija*, god. 37 (1988) 1, 5-9.

<sup>26</sup> Nenad Švarc, Tomislav Robina, Špoljarić M. (2019.), »Razvoj tržišta regulacijskih usluga – stanje i perspektiva«, HEP-Proizvodnja d.o.o., dostupno na: [http://het.hr/wp-content/uploads/2019/01/Razvoj-tr%C5%BEi%C5%A1ta-regulacijskih-usluga-stanje-i-perspektiva\\_%C5%A0varc.pdf](http://het.hr/wp-content/uploads/2019/01/Razvoj-tr%C5%BEi%C5%A1ta-regulacijskih-usluga-stanje-i-perspektiva_%C5%A0varc.pdf), pristup 18. 4. 2019.

<sup>27</sup> *Večernji list*, 18. 8. 1971. (Br. 3715., str. 2.).

<sup>28</sup> Da je petogodišnji plan iz 1947. navodi se u [18, str. 29.], a također na jednoj pronađenoj shemi koju sam pronašao navodi se da je ona iz petogodišnjeg plana iz 1947.

visokonaponskim sustavom<sup>29</sup>. Zatim je stručni savjet *Zajednice elektroprivrednih poduzeća Hrvatske* (ZEPH) 1954. godine izradio smjernice za projektiranje vodova iznad 110 kV-ti, čiji je neposredni zadatak bio projekt izgradnje voda *Dalmacija - Zapadna Hrvatska* [5, str. 91.]. *Izvršno vijeće Sabora NR Hrvatske* odobrilo je 1954. investicijski program koji je uključivao vod *Dalmacija – Zapadna Hrvatska* [5, str. 94.]. 1958. izgrađen je ispitni vod duljine 998 metara na Zrmanji, koji je služio za motrenje klimatoloških uvjeta k cilju izgradnje voda koji bi povezivao Dalmaciju i sjeverozapadnu Hrvatsku. Trasa voda trebala je ići vrlo različitim i djelomično teškim terenima<sup>30</sup>, ugroženima ostrim klimatološkim prilikama. Bilo je zagovornika da taj vod ide preko Bosne i Hercegovine (vrbaskom ili unskom trasom) ali je ipak pobijedila jadranska trasa koju je predložila hrvatska elektroprivreda [9, str. 200.-3.].

Dubrovnik je 1963. povezan s Hercegovinom (Mostar) na 110 kV-tnoj razini, a tek 1989. izravno s ostatkom teritorija Hrvatske pri 110 kV-tnom naponu preko njezina teritorija [6].

Preostala izgradnja objekata bitnih za šire razmjene. Zorko Cvetković (r. 1924.)<sup>31</sup> objašnjava da su se razlozi za prisilno ograničenje potrošnje (redukcije) krili, ne u manjku električne energije, nego u nedovoljnoj izgrađenosti mreže. Prvo prisilno ograničenje potrošnje iz 1954. dovelo je do izgradnje dalekovoda između Hrvatske (Zagreb) i Bosne (Jajce), a drugo iz 1973. do izgradnje 400 kV-tnog dalekovodnog prstena kroz cijelu Jugoslaviju (prsten *Nikola Tesla*). Jedan od ozbiljnih razloga zbog kojih se mreža nije gradila je u tome što se vjerovalo da izgradnja prijenosne mreže smanjuje vjerojatnost za izgradnju vlastitih izvora energije. Također, zanemarivala se potreba za kompenzacijom jalove energije (izgradnja kondenzatorskih baterija)<sup>32</sup>. Struka je stavljena u drugi

---

<sup>29</sup> Boris Markovčić (1978.), »20 godina jedinstvenog jugoslavenskog sistema«, *Energija*, 1978, br. 1-2, str. 7.

<sup>30</sup> Teoretski okvir za izbor trase u Jugoslaviji opisan je u publikaciji: *Zajednica elektroprivrednih organizacija Hrvatske, Dalekovod Zagreb (1986.). TIPIZACIJA DALEKOVODA 110 kV U SR HRVATSKOJ.* Zagreb, str. 19.-26.

<sup>31</sup> Zorko Cvetković (r. 1924.), doktorirao je elektrotehniku u Zagrebu na temu *Prilog planiranju prijenosne mreže u srednje razvijenim elektroenergetskim sistemima*, a radio je u elektroprivredi od pripravnika do direktora, bio je istaknuti sportaš.

<sup>32</sup> Jalovi tok energije prolaskom kroz dalekovode stvara, povećavajući jakost struje, dodatne tehničke gubitke energije, stoga se tok jalove energije kroz dalekovode nastoji smanjiti. Navedeno se primjerice može postići tako da se blizu potrošača s induktivnom sastavnicom u smislu jalovog toka energije (npr. motor) postavi kapacitivni element (npr. kondenzatorska baterija), čime se ta dva jalova toka lokalno poništavaju i nemaju priliku prolaziti dalekovodima. Jače strujno opterećenje dalekovoda povećava struju kroz vodoravni induktivni element dalekovoda (zavojnica u  $\pi$  modelu dalekovoda) a viši naponi povećavaju struju kroz okomitu kapacitivnu sastavnicu dalekovoda (kondenzator u  $\pi$  modelu dalekovoda). Kompenzacijski rad elektrane *RHE Velebit* (jedan od tri režima rada: proizvodnja električne energije, crpni/pumpni rad i kompenzacijski rad) za potrebe regulacije napona i jalove snage u stanju s visokim naponima (jača struja kroz kondenzator  $\pi$  modelu dalekovoda) induktivnim tokom jalove energije poništava kapacitivnu sastavnicu dalekovoda, a slično se može postići promjenom radne točke generatora (npr. bez mijenjanja isporuke djelatnog toka energije u mrežu). Pogledati Cvetkovićev osvrt na raspad sustava 1986. koji obuhvaća ulogu jalovog toka energije kao čimbenika raspada, *Energija*, god. 36 (1987) 2, 121-5.

plan<sup>33</sup>. Povodom znatnih redukcija građene su u Hrvatskoj elektrane (1976. *PTE Osijek* i *PTE Jertovec* [7, str. 76.]).

Prvi »pravi«<sup>34</sup> visokonaponski prijenos električne energije bio je 1940. između Italije (Opicina) i Istre (Matulji) a zbio se 30 godina nakon prvih primjena 110 kV-tnih napona u Europi [7, str. 71.]. Zanimljivost je da su se, za vrijeme kriznog stanja tijekom *Tršćanske krize* (1945. -1954.) dogovarale razmjene električne energije između Jugoslavije i Italije<sup>35</sup>, a i zanimljivost je iz *Drugoga svjetskoga rata* da SAD, iako svjestan važnosti njemačke elektroenergetske mreže, nije ju izravno uništavao [1, str. 118.]. Provedeno je 1948. odvajanje visokonaponske mreže Istre od trafostanice u Italiji (Opicina) [5, str. 78.], iako se u jednom izvješću iz 1950. navodi da je iz Italije (Trst) za Istru kupljeno 5 GWh električne energije [10, str. 65.-6.], a Istra je (osim dvaju ugljenokopa) 1951. prebačena u slovenski i sjeverozapadni hrvatski sustav [6, str. 24.]. Uspostavlja se 1958. godine 120 kV-tni dalekovod između Hrvatske (Nedeljanec) i Mađarske (Söjtör) [6, str. 24.], a i 1969. je između Hrvatske (Nedeljanec) i Mađarske (Söjtör, op. Söjtör) izgrađen 110 kV-tni dalekovod [5, str. 112.]<sup>36</sup>. Mađarski se sustav 1952. povezuje s čehoslovačkim, a 1959. gotovo cijelim mađarskim teritorijem razgranata je visokonaponska mreža [13]. COMECON (*The Council for Mutual Economic Assistance*, op. koriste se i kratice CMEA i CAME) je osnovan 1949., a kao ekonomska sličnovrijedna organizacija kao i *European Economic Community*, davao je plodove u smislu bilateralnih dogovora o prekograničnim vodovima, koji su bili koordinirani od strane *Central Dispatch Organisatio of the Interconnected Power Systems* (CDO / IPS), koji je djelovao u Pragu od 1959. do 1962. [4, str. 13.], dok je 1962. potpisan sporazum za uspostavu *Central Dispatch Control* (kod Mađara CDU, prema *Centralnoje Diszpetserszkoje Upravlénijje*), koji je služio za organizaciju državnih elektroenergetskih sustava. Mađari koriste i naziv CDU VERE kako bi označili elektroenergetske sustave u okviru COMECON-a [13, str. 235.-6.]. Srbija se 1960. povezuje na 110 kV-tnoj razini s Mađarskom, a s Bugarskom se Srbija povezuje 1961. (1964. s još jednim 110 kV-tnim vodom) [16, str. 69.]. CDU VERE (Bugarska, Čehoslovačka, Poljska, GDR i Rumunjska) osnovan 1963., do 1978.

---

<sup>33</sup> Zorko Cvetković (2009.). *Život s elektroprivredom*, Kigen d.o.o., Zagreb, str. 51.-3.

<sup>34</sup> U literaturi je riječ *pravi* stavljena u navodnike.

<sup>35</sup> Hrvoje je Požar »u situaciji kada se ispod i oko dalekovoda na granici s Italijom osjećala teška i tmurna napetost rata, pa čak i povremeno pucalo, dogovarao razmjenu električne energije s Italijom. Tako su struka i energija odigrale svoju veliku i značajnu miroljubivu ulogu«, Energetski institut Hrvoje Požar (2003.). *HRVOJE POŽAR Velikan energetike i moderne sveučilišne nastave*, 2003., str. 53.-4.

<sup>36</sup> Na shemi iz priloga knjizi [9] za 1973. godinu vidi se jedan 110 kV-tni vod između Hrvatske i Mađarske.

radi odvojeno od sovjetskog SZU EVER (*only to Lvovenergo*), a od tada počinju raditi u sinkronome pogonu<sup>37</sup> [13].

Sinkroni (paralelni) pogon<sup>38</sup> preko 110 kV-ne mreže na teritoriju Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Srbije i Crne Gore započeo je 1957.<sup>39</sup>, s time da su Dalmacija, kao i Slavonija, bile povezane 110 kV-tnom mrežom sa sjeverozapadnom Hrvatskom posredno preko Bosne i Hercegovine, a na teritoriju Istre nije ni bilo 110 kV-tne mreže (osim rubno na istočnom dijelu gdje je mreža išla prema Sloveniji). Vojvodina u tome pogonu nije bila izravno povezana 110 kV-tnom mrežom sa sjeveroistočnom Hrvatskom. Između Crne Gore i Srbije nema 110 kV-tnih vodova<sup>40</sup>. Tu, dakle, imamo tri 110 kV-tna pravca prema Bosni i Hercegovini iz Hrvatske (Slavonija, sjeverozapadna Hrvatska, Dalmacija), dok je Bosna i Hercegovina sa Srbijom povezana jednim 110 kV-tnim pravcem, kao i s Crnom Gorom. Dakle, o međurepubličkim razmjenama ima za 1957. smisla govoriti samo o onima između Hrvatske te Bosne i Hercegovine, kao i između Hrvatske i Slovenije. Iako, uvozno-izvozne mogućnosti iz Bosne i Hercegovine sa Srbijom te s Crnom Gorom mogle su utjecati na uvozno-izvozne razmjene Bosne i Hercegovine s Hrvatskom, to bi bilo u okviru pojma *neizravna razmjena* (npr. iako su se države UCPT-e protivile uvozu istočno od *Željezne zavjese*, imale su korist od toga što je Austrija kao tranzitna država uvozila električnu energiju od tih država u UCPT-e sustav [1, str. 192.-93.] – to bi za neaustrijske sustave u UCPT-u bila *neizravna razmjena*). Glede međudržavnih razmjena ima smisla govoriti o razmjenama između Hrvatske i Mađarske, iako ne u sinkronom radu, nego u stanju gdje je jedan dio sustava prelazio u otočni pogon i spajao se na drugi. Ranije je sjeverozapadna Hrvatska (Zagreb) bila 110 kV-tnim vodom (u početku pod 30 kV-ti) povezana 1943. sa Slovenijom (Brestanice), koja je već 1939. imala jedinstven elektroenergetski sustav<sup>41</sup>, a prije toga su Slovenija (Maribor) i Hrvatska (Varaždin) bili povezani 1928. [5, str. 45.], i

---

<sup>37</sup> Drugdje se navodi: »...the Central Eastern European pool was synchronized with the Soviet system in 1962.« [3, str. 20.]

<sup>38</sup> Sinkroni je pogon način rada u kojemu se trajno razmjenjuje električna energija dvaju sustava koji rade na istoj frekvenciji u iznosu i vremenu, za razliku od sustava povezanih samo istosmjernim vodovima (HVDC) koji mogu trajno razmjenjivati električnu energiju preko učinkovite elektronike (s programiranom vrijednosti razmjene električne energije) za razliku od prakse gdje se jedan dio sustava odspaja od jednog sustava i priključuje na drugi da bi radio s njim u sinkronom pogonu. Iako, to što postoji HVDC ne mora nužno značiti da sustavi nisu u sinkronom pogonu (npr. moderni podmorski HVDC vod između Italije i Crne Gore). U stanju gdje je elektroenergetski sustav povezan u izmjeničnom sinkronom radu s više sustava, teško je utjecati na količinu toka energije na pojedinoj granici u pogonu, stoga je zadaća postići što je više moguće poklapanje između sustavske netovrijednosti toka energije prema drugim sustavima i netokoličine dogovorenih ekonomskih razmjena utvrđenima s tim istim sustavima *ex ante* (program razmjene) u pojedinom dijelu vremena (npr. unutar sata) – za tu svrhu i za regulaciju frekvencije služile su sekundarna i tercijarna regulacija.

<sup>39</sup> O ovome spajanju pisao je Božidar Stefanini, *Energija* 7 (1958), br. 5-6, str. 156.-9.

<sup>40</sup> Pogledati shemu mreže: *Energija* 7 (1958), br. 5-6, str. 156.-9.

<sup>41</sup> Boris Markovčić (1978.), »20 godina jedinstvenog jugoslavenskog sistema«, *Energija*, br. 1-2, str. 5.

prije no što će se 1930. godine 30 kV-tnim vodom povezati Zagreb i Karlovac, zbog potreba Zagreba za električnom energijom i zbog dopunjavanja rada hidroelektrične proizvodnje u Karlovcu s termoelektričnom proizvodnjom u Zagrebu [6], [5, str. 49.].

U Hrvatskoj je 1957. izgrađen 220 kV-tni vod od Dalmacije (Zakućac) do Hercegovine (Mostar), a prvi vod je 1962. stavljen pod 220 kV-tni napon od Dalmacije (Split) do sjeverozapadne Hrvatske (Zagreb) [9, str. 205.-6.]. Početkom 60tih izgrađen je vod od Crne Gore (Titograd) preko uže Srbije (Bajina Bašta) do Vojvodine (Srbobran), a 1965. ulazi u pogon dalekovod između Crne Gore (Titograd) i Hercegovine (Trebinje) [15, str. 110.]. Od 1973. najkasnije do 1983. godine 220 kV-tna mreža stagnira (u tome razdoblju nije izgrađen novi 220 kV-tni vod) te se priprema izgradnja 400 kV-tne mreže [9, str. 205.-6.]. Krajem razmatranoga razdoblja (do 1990.) Vojvodina nije bila izravno povezana sa 220 kV-tnim dalekovodima sa sjeveroistočnom Hrvatskom, kao što s 220 kV-tnim dalekovodima nije bila izravno povezana sjeveroistočna Hrvatska sa sjeverozapadnom Hrvatskom, a ni Bosna i Hercegovina sa Srbijom, osim kada je riječ o elektranama na granici [10, str. 118.]. Ipak, gradili su se 110 kV-tni vodovi, tako je 110 kV-tni vod između sjeveroistočne Hrvatske (Vukovar) i Vojvodine (Šid) 1977. stavljen u pogon [5, str. 120.-1.]. Godine 1967. se 220 kV-tnim dalekovodom vodom (s 220 kV-tnim naponom) povezuju Slavonija (Đakovo) i Bosna (Tuzla), a 1966. pušten je u pogon sa 110 kV-ti [9], [6]. SUDEL-ov 220 kV-tni prsten formiran je na teritoriju Slovenije, Austrije i Italije 1970.<sup>42</sup> Valja dometnuti da su izgrađeni 400 kV-tni vodovi do prelaska na 400 kV-tni napon bili privremeno radili pod 220 kV-tni naponom, a prijelaz na 400 kV-tni napon bio je 1977. [6, str. 8.]. Prvi dalekovod između Jugoslavije i Grčke izgrađen je 1961. (za 1977. spominje se 150 kV-tni vod između Jugoslavije i Grčke<sup>43</sup>), a prethodno izgradnji vođena je u Grčkoj polemika o njegovoj svrsishodnosti i financijskoj isplativosti tog projekta za Grčku [21, str. 159., 165.-7.].

Iz gore navedenog proizlazi da ima smisla govoriti o trajnim međudržavnim razmjenama od sredine 70tih (220 kV-tnim naponom), i to između Hrvatske, posredno preko Slovenije, s UCPTE-om, preko Italije i Austrije (sinkroni rad od 1975.), a i s Grčkom (sinkroni rad 1976.) posredno putem jugoslavenskih republika. Tu valja imati na umu i razmjene s CDU VERE-om. U IV. svesku *Tehničke enciklopedije zagrebačkoga izdavača* iz 1973., izneseno je pozitivno mišljenje o povezivanju elektroenergetskih sustava (npr. potrebe za manjim rezervama u sustavu, međusobna pomoć susjednih sustava, izbjegavanje gubitka hidroenergije, mogućnost izgradnje velikih elektrana, veća sigurnost uslijed postojanja različitih smjerova napajanja i sl.), gdje je ocrtan i način odabira elektrana koje će raditi {»da se (op. elektrane) „smještaju“ u dijagrame na takav način da se potražnja

---

<sup>42</sup> *Energija*, god. 37 (1988) 1, 5-9.

<sup>43</sup> *Energija*, god. 38 (1989), 2, 135-143.

zadovolji uz najmanje troškove», a od troškova se navode troškovi termoelektrana, ne i oportunitetni troškovi hidroelektrana (trošak propuštene prilike) iako se govori da hidroelektrane ne će proizvoditi elektroenergiju neradnim danima. Piše se o razmjeni s drugim sustavima (»opskrba na osnovi dugoročnih ugovora, kratkoročne razmjene energije i razmjene u slučaju kvara«), ali njih nema u optimizacijskom algoritmu kojim se određuju vozni redovi elektrana dan za danom<sup>44</sup>.

Jugoslavija je 1972. sklopila ugovor s *Međunarodnom bankom* za financiranje 400 kV-tne mreže [5, str. 115.], a Mladen Dokmanić<sup>45</sup> je 1962. zagovarao ideju da se ne gradi 220 kV-tna mreža nego samo 400 kV-tna i 110 kV-tna, koja nije prihvaćena tako da se išlo na inačicu s tri visokonaponske razine<sup>46</sup>. Prvi stup 400 kV-tnoga voda u Hrvatskoj podignut je 1974., a potom je 1976. izgrađen 400 kV-tni vod od Bosne (*Tuzla – Ugljevik*) do Slavonije (Ernestinovo) i drugi od Hercegovine (Mostar) do Splita (Konjsko). Godine 1975. se Srbija povezuje s Bugarskom na 400 kV-tnoj razini [16, str. 69.]<sup>47</sup>. Bugarski sustav slovio je kao elektroenergetsko središte (*power hub*) zbog bogatstva izvora za proizvodnju električne energije, a imao je znatne mogućnosti razmjena električne energije s SSSR-om [21, str. 131.-83.], stoga bi u okviru koncepta *nesusjedna izmjena* valjalo istražiti njegov utjecaj na Hrvatsku. Godine 1976. godine u Sloveniji je počeo s pogonom 400 kV-tni elektroenergetski sustav<sup>48</sup>. 1978. godine pod 220 kV-tnim naponom pušten je 400 kV-tni vod od Splita (Konjsko) do Rijeke (Melina). Godine 1978. godine stavljen je pod napon sjeverni potez 400 kV-tnog prstena koji je išao od Slovenije (Maribor) preko Zagreba (Tumbri) i Slavonije (Ernestinovo) do Srbije (Obrenovac), a od 1981. je pod 400 kV-tnim naponom vod od Splita (Konjsko) preko Rijeke (Melina) do Slovenije (Divača), dok je od 1983. pod 400 kV-tnim naponom vod od Splita (Konjsko) do Hercegovine (Mostar) [6, str. 29.-30.]. Ranije je, 1979. godine, pušten u pogon 400 kV-tni vod od Slovenije (Divača) do Rijeke (Melina) i od Rijeke prema Dalmaciji (*RHE Velebit*), privremeno pod 220 kV-tnim naponom [6, str. 42.-4.]. Godine 1980. je u pogon stavljen 400 kV-tni vod između Italije

---

<sup>44</sup> »ELEKTRIČNE MREŽE«, jakostrujne, [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricne\\_mreze.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricne_mreze.pdf), »ELEKTROENERGETSKI SISTEM«, [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektroenergetski\\_sistem.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektroenergetski_sistem.pdf), pristup 23. 11. 2022.

<sup>45</sup> Mladen Dokmanić (r. 1908.) je bio izvanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu.

<sup>46</sup> Više o Dokmanićevoj ideji ovdje: <https://hro-cigre.hr/arhiva/miljokaz/1908-roden-mladen-dokmanic>, pristupljeno 19. 3. 2021.

<sup>47</sup> Veze Bugarske s drugim državama: 1961. Srbija 110 kV; 1964. Srbija 110 kV; 1972. 400 kV s SSSR-om (Moldova) i s Rumunjskom; 1975. Srbija 400 kV; 1975. Turska 400 kV; 1980. Makedonija 110 kV; 1986. Rumunjska 400 kV (iz Kozloduy NNP); 1987. SSSR (Ukrajina) 750 kV-ti i s Rumunjskom; 1988. Grčka 400 kV-ti; planirano za 1999. Makedonija 400 kV [16, str. 69.]. Drugdje se navodi da je Bugarska 1967. povezana s COMECON-om preko Rumunjske s 220 kV-ti a na drugom mjestu se spominje da je inauguriran 1965., da je veza s SSSR-om preko Rumunjske na 750 kV-ti bila 1988., također da je veza sa Srbijom 1975. uspostavljena na 220 kV-ti i kasnije podignuta na 400 kV-ti, osim toga i da je 400 kV-tni vod s Grčkom počeo s radom početkom 80-tih [21, str. 139, 144., 148.]

<sup>48</sup> <https://www.nek.si/hr/o-nama/nek-kroz-vrijeme>, pristup 28. 11. 2022.

(Redipuglia) i Slovenije (Divača) [14, str. 19.]. 1981. je u pogonu 400 kV-tni vod od Splita (Konjsko) preko Rijeke (Melina) do Slovenije (Divača) [6, str. 29.], a iste se godine pod 400 kV-tni napon stavlja vod od Splita (Konjsko) do Hercegovine (Mostar) [5, str. 126.]. *NE Krško* izgrađena američkom tehnologijom, 1981. počela je s proizvodnjom električne energije, a iz nje će se prenositi električna energija s četiri dalekovoda, s dva prema Zagrebu, trećim prema Mariboru i četvrtim prema Ljubljani [5, str. 126.]<sup>49</sup>. Godine 1980. se 110 kV-tnim vodom povezuju Bugarska i Makedonija [16, str. 69.]. Od Italije preko Slovenije i Dalmacije do Hercegovine (Mostara) je dakle 1981. u pogonu 400 kV-tni dalekovod, a postojao je 400 kV-tni krak od Slovenije preko Slavonije do Srbije, kao i iz Slavonije prema Bosni. Pod napon je 1984. stavljena 400 kV-tna mreža od Kosova preko Crne Gore (Ribarevina – Podgorica) do Hercegovine (Trebinje), čime je završena južna magistrala prstena *Nikola Tesla* [15, str. 151.-2.]<sup>50</sup>. Srbija (Subotica) i Mađarska (Sándorfalva) se 1988. povezuju na 400 kV-tnoj razini [13, str. 243.]. Prethodno je 1960. Srbija bila na 110 kV-tnoj razini povezana s Mađarskom, a s Bugarskom je Srbija povezana 1961. godine. Bugarska je 1975. bila povezana 400 kV-tnim dalekovodom sa Turskom a 1988. godine 400 kV-tnim vodom s Grčkom, koja je tada u sinkronom pogonu s UCPTE-om [16, str. 69.]. Gradnja 400 kV-tnog voda od Rijeke (Melina) do Zagreba (Tumbri) započela je 1989. [5, str. 135.]. Do 1990. nije bilo ni 400 kV-tne ni 220 kV-tne veze između Hrvatske i Mađarske, ali je zato 1957. bio 120 kV-tni vod a 1969. novi 110 kV-tni vod [5, str. 112.]. Najbolju shemu jugoslavenske visokonaponske mreže objavila je *Elektroistra* 1990., na kojoj je vidljiv 110 kV-tni vod između Vojvodine i Rumunjske, dva 110 kV-tna između uže Srbije i Rumunjske te jedan 400 kV-tni koji je počeo s radom 1970. (*HE Đerdap*)<sup>51</sup> [10, str. 118.].

Prema iznad navedenom vidljivo je da se izgradnjom 400 kV-tnih vodova (neovisno rade li privremeno pod 220 kV-tnim naponom), čija je izgradnja započela 1974., nastavilo s procesom pojačavanja međupodručnih veza u Hrvatskoj, kao i međurepubličkih veza te međudržavnih veza. Također, 1984., sa završetkom 400 kV-tne mreže od Hercegovine (Trebinje) preko Crne Gore do Kosova, Hrvatska je posredno preko Hercegovine i Crne Gore povezana s Kosovom, jer ranije je Hercegovina (Bileća) bila povezana s Crnom Gorom 1954.<sup>52</sup> [15, str. 107.]. Budući da su Kosovo i

---

<sup>49</sup> <https://www.nek.si/hr/o-nama/nek-kroz-vrijeme>, pristup 28. 11. 2022.

<sup>50</sup> Previsoki naponi, uslijed neodgovarajućeg pristupa jalovoj energiji (kompenzacijske prigušnice), onemogućavali su prve pokušaje stavljanja južne magistrale pod 400 kV-ti [9, str. 224.].

<sup>51</sup> Ta godina se navodi u [14, str. 16.]. U surječju s hidroelektranom *HE Đerdap* navodi se da su potrebe prijenosa prerasle 220 kV-tnu razinu. Razlog za prelazak na 400 kV-tnu razinu bijaše potreba da se na ekonomski najpovoljniji način prenese energija iz *HE Đerdap*, prema potrošačkim središtima u Beogradu i Boru, Boris Markovčić (1978.), »20 godina jedinstvenog jugoslavenskog sistema«, *Energija*, 1978, br. 1-2, str. 5.-10.

<sup>52</sup> 1984. se za Crnu Goru navode sljedeći međurepublički i međudržavni dalekovodi: tri 110 kV-tna dalekovoda, dva 220 kV-tna i jedan 400 kV-tni vod s Bosnom i Hercegovinom, jedan 110 kV-tni i dva 220 kV-tna sa Srbijom, jedan



Makedonija najkasnije 1957. bile povezane na 110 kV-tnoj razini, Hrvatska je dio elektroenergetske mreže u sinkronom pogonu s preostalim jugoslavenskim sustavom, s grčkim sustavom i preostalim UCPTE-om. Veze CDU VERE-a s jugoslavenskim elektroenergetskim sustavom nisu bile u sinkronom pogonu. Vjekoslav Srb 1984. opisuje stanje s međurepubličkom i međudržavnom povezanošću: »Postoji tehnološka povezanost jedinstvenog elektroenergetskog sistema Jugoslavije, mreža koja povezuje sve izvore. Naša mreža je mrežom snage 700 MW povezana s Evropom (sa Zapadom i Istokom)...Zapadni dijelovi Jugoslavije su siromašniji izvorima energije i posebno električnom energijom pa to uvjetuje razlike u sistemima i konačno u cijeni električne energije«, i podsjećao je da bi Hrvatska i Slovenija trebale financirati u jednakom udjelu drugu nuklearnu elektranu na Prevlaci<sup>53</sup>. Jugoslavija je 1970. bila neznatan netouvoznik iz UCPTE-a i iz CDU VERE-a, dok je 1980. bila netouvoznik iz CDU VERE-a i netoizvoznik prema UCPTE-u u znatnim količinama, što govori da je kroz nju u godišnjoj bilanci ulazila elektroenergija iz jednog a iz njega izlazila energija drugi sustav (tranzit) [1, str. 198.]<sup>54</sup>, ne nužno istovremeno u stvarnom vremenu, i izgleda ne putem HVCD tehnologije, nego tako da se jedan dio jugoslavenskog sustava prebaci u otočni pogon i bude priključen na CDU VERE mrežu, a da drugi ostane u sinkronom pogonu s UCPTE-om. Na taj je način od 1975. do 1985. na 400 kV-ti bugarska električna energija isporučivana u tursko područje (Turska je bila u NATO savezu), nakon čega je Bugarska (članica *Varšavskog pakta*<sup>55</sup>) prekinuvši međunarodni sporazum obustavila isporuku u Tursku što je između njih pogoršalo odnose [21, str. 151.].

Legendijk i Frank Schipper 2016. su u svojem radu *The Material Links of Cold War Yugoslavia, 1948-1980* stavili u središte svojeg rada hladnoratovsku izgradnju jugoslavenske elektroenergetske mreže, kao i cestovne. Tu su pokazali da je zapadna pomoć Jugoslaviji bila u kontekstu tehnoloških prepreka koje je zapad postavio prema istoku, što je korišteno kao sredstvo u

---

400 kV-tni s Kosovom i jedan 220 kV-tni s Albanijom. Godine 1988. pušten je u rad 220 kV-tni vod između Crne Gore (Pljevlja) i Srbije (Prijeplje) [15, str. 152.].

<sup>53</sup> *Slobodna Dalmacija*, 9. 2. 1984., str. 3.

<sup>54</sup> Broj interkonekcija, količina uvezene električne energije i količina izvezene električne energije. redom je uz pojedine godine sljedeća: 1955. (CDU 0, 0 GWh, 0 GWh; UCPTE 3, 0 GWh, 44 GWh), 1960. (CDU 1, 0 GWh, 94 GWh; UCPTE 4, 30 GWh, 30 GWh), 1970. (CDU 6, 162 GWh, 78 GWh; UCPTE 7, 199 GWh, 74 GWh), 1970. (CDU 6, 162 GWh, 78 GWh; UCPTE 7, 199 GWh, 74 GWh), 1980. (CDU 10, 1.132 GWh, 464 GWh; UCPTE 10, 175 GWh, 1.249 GWh).

<sup>55</sup> *Varšavski pakt* (točan naziv *Varšavski ugovor*) je vojno-politička organizacija više europskih komunističkih država koja je djelovala 1955–91. radi obrambene i sigurnosne suradnje, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63939>, pristup 31. 5. 2023.

*Hladnom ratu* (*technopolitics*<sup>56</sup>, *entangled geographies*<sup>57</sup>). Nakon razlaza Jugoslavije i SSSR-a 1948. (zbog jugoslavenske imperijalne politike i ideoloških razlika), Jugoslavija je prešla na zapadnu stranu (SAD je 1950. autorizirao pomoć Jugoslaviji), te je zahvaljujući tome dobivala i tehnologiju koja je bila klasificirana i kao vojna i kao civilna (*dual-use*). Američki je cilj bio, na primjeru Jugoslavije<sup>58</sup>, drugim socijalističkim državama u Europi pokazati put za prelazak na zapadnu stranu. Jugoslavija je 1957. prestala prihvaćati zapadnu vojnu pomoć, te je započela ekonomski surađivati i s državama koje su bile s komunističke strane *Željezne zavjese*. Također, Jugoslavija je poslužila zapadu da bi se preko njezina teritorija Grčka povezala sa svojim NATO saveznicima [18, str. 29., 31.-3., 35., 45.-6.]. Očito je da su prethodno navedeni čimbenici imali utjecaja na izgradnju elektroenergetske mreže u Jugoslaviji (npr. zapadni krediti i bespovratna pomoć).

### **3. Povijesni tragovi o međurepubličkim i međudržavnim razmjenama električne energije**

Alojzije Ščap je 1957. u časopisu *Energija* u Jugoslaviji opovrgavao predrasudu da je u tržišnom sustavu, kakav je austrijski, nemoguće voditi ekonomičan pogon, obrazlažući način na koji je to u Austriji postignuto<sup>59</sup>. Međurepubličke razmjene razvijene su 1945. godine između devet austrijskih republika po tržišnim principima, što podrazumijeva da je svaka austrijska republika slobodno nabavljala energiju za sebe. Državno poduzeće otkupljuje električnu energiju od državnih elektrana i prodaje ju republikama po jedinstvenim cijenama, a republike imaju i svoje elektrane od kojih državno poduzeće otkupljuje samo viškove. Republike su odlučivale hoće li kupovati električnu energiju od državnog poduzeća, u ovisnosti o cijeni te energije prema cijeni i dostupnoj količini vlastite proizvodnje. Osim toga je svaka austrijska republika mogla slobodno određivati cijene za svoje potrošače. Sličnost Austrije i Jugoslavije bila je u tome što Austrija nije pristupila NATO-u ni *Varšavskom paktu* a Jugoslavija nije bila formalni član NATO-a<sup>60</sup> i nije bila u *Varšavskom paktu*, a i

---

<sup>56</sup> *Tehnopolitics* označava isprepletenost tehnologije, politike i kulture, pojam je skovala Gabriellea Hecht.

<sup>57</sup> *Entangled geographies* sintagma je koja označava korištenje tehnoloških sustava i ekspertnih znanja s ciljem oblikovanja ili preoblikovanja političke vladavine, ekonomskih dogovora, socijalnih odnosa i kulturnih oblika u kontekstu građenja carstva.

<sup>58</sup> »Only a few asynchronous connections between East and West materialized, including the link via Yugoslavia (supported by NATO to lure Yugoslavia further away from the socialist block)...« [3, str. 20.].

<sup>59</sup> *Energija* VI (1957), br. 3-4, str. 88.-89.

<sup>60</sup> U strahu od korejskog scenarija iz 1950., Jugoslavija je od 1952. u vojnom savezu sa zapadom, a 1954. je Jugoslavija sklopila *Balkanski savez* s Turskom i Grčkom koje su bile članice NATO-a [18, str. 33.].

u tome što su obje države bile podijeljene na republike. Razlika je što je Austrija jednonacionalna država, a Jugoslavija je bila višenacionalna (različit pogled na prošlost, sadašnjost i politička volja za budućnost od strane već oblikovanih nacija<sup>61</sup>). Sličnost između Austrije i Jugoslavije je da su u *Hladnom ratu* služile kao tranzitne države u smislu razmjene električne energije s dviju strana *Željezne zavjese*, o čemu je pisao Lagendijk. Razlika je u tome što je Austrija imala svjetske odličnike u tržišnoj ekonomiji (npr. Friedrich August von Hayek<sup>62</sup>, Joseph Alois Schumpeter r. 1883. autor sintagme *creative destruction*<sup>63</sup>), dok je u Jugoslaviji vladala isključiva anti-tržišna (socijalistička, marksistička) paradigma, iako su krajem 80-tih godina postojali (barem deklarativni) javni zagovornici zapadno-tržišnih principa (npr. Ante Marković). Eda bi se razumjele međudržavne razmjene između Jugoslavije i okolnih država, potrebno se upoznati sa tržišno-ekonomskim UCPTE-om (npr. opiranje projektu SUDEL) i socijalističkim CDU VERE-om (istočno od *Željezne zavjese*).

U švedskom sustavu 1961. bilo je više od pola elektrana u privatnom vlasništvu, koje su određivale rad svojih elektrana prema tržišnim principima, dok su im upravitelji, prema potrošnji koju moraju namiriti, i u ovisnosti o cijenama te dostupnosti vlastite proizvodnje prema cijenama i dostupnosti proizvodnje drugih proizvođača i potrošnji koju ti drugi moraju namiriti, s njima slobodno trgovali, dok su švedski potrošači imali sigurnu i kvalitetnu opskrbu električnom energijom. Švedske državne elektrane igrale su ulogu razmjenjivanja električne energije s Danskom, Norveškom i Finskom. Finski slučaj je s organizacijskog gledišta sličan švedskom. S druge je strane u Švicarskoj postojao veliki broj različitih vlasnika elektroprivrednih objekata, a imala je u odnosu na skandinavske države drugačiji položaj, jer je bila jače ovisna o susjednim sustavima. Imala je intenzivnu razmjenu sa susjedima čemu je doprinosila činjenica da su joj gotovo sve elektrane bile hidroelektrane. Različiti dionici u Švicarskoj samostalno su trgovali, pa se događalo da je u isto vrijeme jedan švicarski dionik izvezio električnu energiju a drugi ju uvezio. Bilo je nekoliko graničnih elektrana koje su pripadale i dionicima iz drugih država. Tehnički gledano švicarski je sustav dobro funkcionirao [20].

---

<sup>61</sup> Da je postjugoslavnenstvo kao koncept prostorno-kulturno gledano karikaturalan, proizlazi iz rada Mirjane Kasapović (2023.), »Zbogom postjugoslavenstvu!«, *Analizirajući Hrvatskog politološkog društva : časopis za politologiju*, Vol. 20 No. 1, 2023., <https://hrcak.srce.hr/clanak/434468>, pristup 30. 5. 2023.

<sup>62</sup> Friedrich August von Hayek (r. 1889.), utjecajan ekonomist koji je bio je protivnik planske ekonomije i zagovornik liberalne tržišne ekonomije (npr. u knjizi *The Road to Serfdom* iz 1944.), a osim toga i urednik knjige iz 1954. *CAPITALISM AND THE HISTORIANS* koja je demitizirala poimanje industrijalizacije (XIX. stoljeće), poslušati razgovor njega i Lea Rostena (r. 1908.) iz 1978. o tim knjigama, <https://www.youtube.com/watch?v=34Bre91Ey3Q>.

<sup>63</sup> Poimao je poduzetnike kao ključne za napredovanje ekonomskog sustava, koji svojim inovacijama izazivaju potrebe u postojećim tržištima (npr. uništavanje renomiranih dionika) i stvaraju nove dionike s novim tehnologijama, <https://www.britannica.com/topic/innovation-creativity/Facilitating-innovation-within-organizations>, pristup 26. 5. 2023.

Kada dolazi do djelomičnog povezivanja na jugoslavenskoj 110 kV-tnoj razini (1957.), u okviru UCPTE-a već su liberalizirane međudržavne razmjene električne energije i uspostavljeni su slobodni međudržavni tržišni odnosi<sup>64</sup>. Od 1951. do 1959. su razmjene električne energije u UCPTE-u rasle brže nego li porast potrošnje, tranzit se odvijao bez ikakvih carinskih i deviznih poteškoća uz načelo energija za energiju (uz korekcijske faktore) i s načelom energija za novac (devizna plaćanja) [11]. 1957. su na 220 kV-tnoj razini prvi puta sinkrono povezane Švicarska, Njemačka i Francuska čime je započelo prekogranično tržište između njih [1, str. 149.], a 1958. gotovo sve elektrane Austrije, Belgije, Nizozemske, Švicarske i zapadne Njemačke rade u sinkronom pogonu [11], dok će 1967. biti povezane 380 kV-tnom naponskom razinom [1, str. 149.]. 60-tih su godina u UCPTE-u mreže bile povezane na brojnim točkama, a vodovi su tvorili visokonaponske prstenove od kojih je prvi bio 1969. (Francuska, Italija i Švicarska) [4, str. 27., 29.].

U organizaciji UCPTE (u početku su članice Austrija, Belgija, Francuska, Italija, Luksemburg, Nizozemska, zapadna Njemačka) pobijedila je ideja decentralizacije<sup>65</sup>. Liberalizacija međudržavnih sezonskih razmjena postignuta je u UCPTE-u 1956.<sup>66</sup>, a potpuna liberalizacija međudržavnih razmjena električne energije bila je u UCPTE-u ostvarena 1959. [4, str. 15.-16.], [1, str. 150.]. Ideja SAD-a, koji je materijalno pomagao zapadnoj Europi, bila je da se u zapadnoj Europi nakon *Drugoga svjetskoga rata* optimum u elektroenergetici postigne tako da se maknu ograničenja u razmjeni električne energije (*costoms union theory*<sup>67</sup>), i na način da se projektira jedinstvena europska mreža i sustav elektrana, gdje vlasništvo ne bi bilo vlasništvo države niti bi se pogon nacionalne mreže vodio nacionalno<sup>68</sup>, što se razlikovalo u odnosu na ono kako su željele i na kraju radile nacionalne države,

---

<sup>64</sup> U UCPTE-ovom nazivlju »liberalizacija« je predstavljala uklanjanje prepreka za kratkoročne i dugoročne međudržavne razmjene električne energije, dok *Europska komisija* tome nazivu 1986. učitava drugi smisao, koji se odnosi na povećanje broja dionika na tržištu (trgovci električne energije, opskrbljivači električnom energijom i proizvođači električne energije u modernom smislu, *Third Party Access*) i razdvajanje netržišnih (prijenos električne energije, razdjela/distribucija električne energije) od tržišnih djelatnosti (proizvodnja električne energije, prodaja električne energije na veleprodajnom tržištu, prodaja električne energije potrošačima) (*unbundling*) [1, str. 206.-8.]. *Europska komisija* je 1992. zatražila da se u okviru UCPTE-a omogući povećanje broja prethodno navedenih dionika [4, str. 34.]. Opskrbljivač električnom energijom u modernom smislu podrazumijeva ulogu koja je komercijalna (ne mora posjedovati elektrane i ne vodi brigu o prijenosnoj mreži), kojoj je cilj ugovoriti kupnju električne energije po nižoj cijeni (uvećanoj za dodatne troškove) od one koju obračunava potrošačima (krajnjim kupcima).

<sup>65</sup> Daniel Feocze (1962.), »UCPTE Udruženje za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije zapadne Evrope«, *Energija*, br. 5-6, str. 127.

<sup>66</sup> »Liberalizacija povremenih razmjena električne energije je postignuta zajedničkim trudom; nekoj zemlji kojoj je potrebna havarijska ispomoć od susjedne države, može ju dobiti s minimalnim kašnjenjem. To se odvija telefonskim pozivom« [4, str. 14., 26.].

<sup>67</sup> Alan Milward: »all restrictions on the movement of factors of productivity were removed from a particular area this would maximize the efficiency with which those factors were used and thus maximize output [...]«.

<sup>68</sup> »European engineers clearly had differing opinions from American ERP officials, who argued for international – and even supranational – ownership and operation of power plants and networks«.

gdje su one gradile svoje nacionalne mreže i s njima upravljale, pritom surađujući s drugim državama [1, 108.-9., 111.-2.]. Operatori elektroenergetskih sustava u okviru UCPTE-a samo su se povremeno bavili optimalnim složajem proizvodnje električne energije iz elektrana, jer su vjerovali da će samoregulirajuće tržišne sile dovesti do ekonomski optimalnog rada elektrana (vozni redovi). Tržišne sile mogle su upogoniti slobodne kapacitete u elektranama vrlo brzo i time osiguravati da na razini Europe rade one elektrane koje imaju najmanje varijabilne troškove (*lowest incremental costs*)<sup>69</sup>. UCPTE-u je inače bilo zabranjeno trgovati električnom energijom. Rasprave o investicijama u elektrane nisu bile u UCPTE-ovom djelokrugu rada, iako se raspravljalo oko pogonskih problema pri razmatranju izgradnje novih elektrana. UCPTE je javno objavljivao planove za razdoblje do godinu dana unaprijed (procjena potrošnje, potreba za uvozom, sigurnošću opskrbe) [4, str. 16., 18.-21.]. Da bi državni sustavi u UCPTE-u mogli biti u globalnom optimumu, bila je potrebna razmjena informacija koja je očito postojala, kao i sloboda ustupljena dionicima da nude tržišne cijene, također i sloboda dionika u odlučivanju o tome koja će elektrana raditi. Budući da se na investicijske troškove elektrana (CAPEX) pogonskim odlukama ne može utjecati (*sunk cost*), u tehno-ekonomskom smislu preostaje postići najmanje varijabilne troškove (OPEX), što je kako se čini postizano u UCPTE-u. To ne znači da su zbirni prihodi od prodaje električne energije drugim državama jednaki varijabilnim troškovima izvozne proizvodnje. Naravno, bila je potrebna slobodna međudržavna razmjena energije koja u UCPTE-u traje od 50tih godina. Razlika između UCPTE-a i JUGEL-a u tome je što je UCPTE bio organizacija državnih elektroprivreda kao pridatak (*add-on*), a JUGEL organizacija republika u okviru jedne države.

Jugoslavija je imala hidropotencijale na rijeci Dravi (Slovenija) te na Cetini i Krki (Dalmacija). Rudnici ugljena bili su u Panoniji (sjever Jugoslavije) i na dinarskim uzvisinama u središnjoj Jugoslaviji. Postojao je hidropotencijal na Dunavu između Rumunjske i Jugoslavije. Tijekom kišne mediteranske zime, elektrane u sjevernoj i središnjoj Jugoslaviji (op. valjda se misli i na hidroelektrane u Dalmaciji) imaju najviše hidroenergije, a tijekom ljeta više vode imaju dravske

---

<sup>69</sup> U modernom elektroenergetskom sustavu elektrane nude na burzama električne energije cijene svojih proizvoda tako da pokriju samo varijabilne troškove proizvodnje (*price takers*). To se tržište opisuje modelom *popis ekonomskog prvenstva* (*merit order list*), gdje se odabiru one ponude za prodaju koje imaju najniže cijene (varijabilne troškove, npr. troškove goriva), vodeći računa o ograničenjima između povezanih sustava (prekogrančni/prekozonski prijenosni kapaciteti). Svi u mrežnom području bez zagušenja dobivaju jednaku cijenu u istom intervalu (*marginal pricing*, *zonal pricing*). Pogledati: Lion Hirth (2023.), »Marginal Pricing and the Merit Order: The Short-Term Equilibrium«, <https://vimeo.com/776662064/44f08c3d7c>, pristup 23. 5. 2023. »Kratkoročno tržište snage u Norveškoj radi od 1971. godine preko organizacije pod imenom Samkjoøringen. Ovo tržište "povremene snage" organizirala je industrija sa 60 norveških članova a indirektno su mu mogli pristupiti švedski i danski proizvođači... Cijene na tržištu su se zbog toga temeljile na "oportunitetnim troškovima" vode (troškovi propuštenih prilika) umjesto na stvarnim marginalnim troškovima generiranja, koji su kod hidroelektrana jednaki nuli«, Steve Thomas (2005.). Direktive Europske unije za prirodni plin i električnu energiju, Public Services International Research Institute University of Greenwich, str. 21.

elektrane uslijed topljenja leda u Alpama [18, str. 41.]. Prema tome, geografski raspored potencijala za proizvodnju električne energije u prostoru (hidroenergija, ugljen) predodređuje potencijale za razmjene električne energije na promatranom području. Geopolitički se odnosi mogu shvatiti kao nadogradnja toga sloja, što će se pokazati u sljedećem odlomku na primjeru dvaju projekata (rumunjsko-jugoslavensko iskorištenje Dunava i *Yougelexport*).

Uslijed sukoba Jugoslavije i SSSR-a, hidropotencijal na Dunavu između Rumunjske i Jugoslavije počeo je davati električnu energiju objema državama tek 1972., a izgradnja brane (*Iron Gate*) započela je 1964. Prvotni plan iz 1956. predviđao je proizvodnju od 35 TWh što je 1963. smanjeno na 10,7 TWh. Budući da je 1950. u zapadnoj Europi već bila iskorištena većina dobrih hidropotencijala, pokrenuta je inicijativa *Yougelexport* u okviru koje bi se investiralo u tadašnji neiskorišten hidropotencijal u Jugoslaviji. Imajući u vidu da jugoslavenska mreža tada nije bila dostatna ni za razmjene električne energije unutar Jugoslavije, planovi su podrazumijevali izgradnju dalekovoda i prema zapadnoj Europi, ali inicijativa nije polučila planirani rezultat (pogledati ranije opisane razloge za takav posljeditak) [18, str. 41.-643.].

U pogledu potrošnje ona je u Jugoslaviji od 1957. do 1987. rasla 8,9% godišnje s godišnjim netouvozom do maksimalno 3,3% i netoizvozom do maksimalno 2,6% [19, str. 252.], u Hrvatskoj je od 1956. do 1990. porast potrošnje bio 7,4% godišnje [6, str. 7.], što je predstavljalo izazov za graditelje jugoslavenskoga elektroenergetskoga sustava. Ipak, Jugoslavija po porastu potrošnje nije bila iznimka u tome elektrifikacijskom razdoblju, koji je na svjetskoj razini rastao 6,4% godišnje u razdoblju od 1950. do 1990.<sup>70</sup> Relativni godišnji iznos netouvoza i netoizvoza ne omogućuju uvid u dinamiku razmjena unutar godine. Zanimljivo bi bilo analizirati porast potrošnje i proizvodnje po jugoslavenskim republikama iz čega bi se mogla dobiti slika koja bi govorila o mogućim količinama razmjena električne energije.

Za uvoz električne energije iz drugih država u Jugoslaviju, kao i za uvoz energenata za proizvodnju električne energije, bilo je važno imati novac u stranoj valuti (devize). Bio je sastanak 1984. na kojemu je sudjelovao i JUGEL, gdje se govorilo u kontekstu novoga zakona o devizama. Pitanje je bilo kako doći do potrebnih deviza za uvoz. JUGEL je ukazao da će se devizna prava utvrđivati u okviru JUGEL-a, ali će se JUGEL za svaki slučaj povezati sa dvadesetak svojih potrošača i izvoznika<sup>71</sup>. *Večernji list*<sup>72</sup> je izvijestio 1984. da je vraćen dug za uvoz električne energije susjednim zemljama. Razlog za prisilno smanjenje potrošnje (redukcije) u Jugoslaviji bio je i u nedostatku

---

<sup>70</sup> <https://www.encyclopedie-energie.org/en/world-energy-consumption-1800-2000-results/>, pristup 9. 9. 2022.

<sup>71</sup> *Večernji list*, 24. 1. 1984. (Br. 7506, str. 3.).

<sup>72</sup> *Večernji list*, 11. 12. 1984. (Br. 7775, str. 4.).

deviza za uvoz mazuta<sup>73</sup> i za uvoz električne energije<sup>74</sup>, a navedeno je posljedak zdravlja jugoslavenskog ekonomskog sustava kao cjeline<sup>75</sup>. Redukcije su u Hrvatskoj od 1948. do 1983. bile različite od nule u 30 godina, za pet godina nema podataka, a u jednoj godini je relativni iznos redukcija bio jednak nuli, najveće redukcije su bile 1964. u iznosu od 9,63% u odnosu na godišnju potrošnju [9, str. 69.], suprotnost tome je stanje zapadnoeuropskih sustava koji od uspostave UCPTE-a nisu imali znatna prisilna ograničenja potrošnje električne energije (redukcije)<sup>76</sup>, iako su iz jugoslavenskog gledišta imali naoko komplicirane unutarnjo-državne tržišne sustave [20]. Osim neodgovarajućom izgradnjom prijenosne mreže, kako je ranije navedeno, redukcijama su pogodovali neodgovarajući (socijalistički) cjenovni signali prema potrošačima energije, koji su dovodili do neracionalnog korištenja energije (stalan trend porasta potrošnje električne energije nepovezan s makroekonomskom situacijom od 1954. do 1987. [19, str. str. 147. i 252.]<sup>77</sup>), o čemu se tada pisalo (npr. Hrvoje Požar, Milan Ivanović, Jure Šimović)<sup>78</sup>. Poljski motiv za izvozom električne energije u UCPTE bio je u potrebi za stranom valutom (devizama) [1, str. 188.], a i Bugarska je povezavši se sa svim susjedima cijnila stranu valutu za električnu energiju koju je izvozila [21, str. 151.].

Jedan od deklariranih ciljeva UCPTE-a je bio povećanje međusobnog povjerenja između država [1, str. 147.-49.]. Skandinavija je bila odmaknuta od ideoloških sukoba s dviju strana *Željezne*

---

<sup>73</sup> *Večernji list*, 20. 9. 1983. (Br. 7402, str. 3.).

<sup>74</sup> *Večernji list*, 19. 11. 1986. (Br. 8369, str. 5.).

<sup>75</sup> Stagnacija brutodomaćeg proizvoda (BDP, GDP) 80-tih uz istovremeni porast potrošnje električne energije. Prijelaz iz eksponencijalnog rasta državnog duga od 1965. do 1981. ( $R^2 = 0,995$ ) prema stagnaciji do kraja promatranog razdoblja. Bio je trajni netouvoz roba veći od nule što je dovodilo do trajnog porasta zbirnog netouvoza roba u Jugoslaviju (godišnji zbirni robni netouvoz računajući od 1954. do promatrane godine, npr. javni dug 1987. bio je 18,6 milijardi dolara, a zbirni robni netouvoz 58,3 milijarde dolara). Izvori: BDP: <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2020>, pristup 24. 5. 2021.; iznos duga te gospodarski uvoz i izvoz: [19, str. 147.], za potrošnju električne energije [19, str. 252.], Miljenko Brekalo, Snježana Penava Brekalo (2018.), »THE CAUSES OF THE PUBLIC FINANCE CRASH IN THE SOCIJALIST FEDERAL REPUBLIC OF YUGOSLAVIA«, *Mostariensia : časopis za društvene i humanističke znanosti*, Vol. 22 No. 2., <https://hrcak.srce.hr/file/339966>, pristup 24. 5. 2021.

<sup>76</sup> Spominje se da kod ekstremno jake zime 1984. gotovo da i nije došlo redukcija električne energije u UCPTE-u, iako su bile redukcije u potrošnji prirodnoga plina u nekim područjima zarad namirenja potrošnje u drugim područjima [4, str. 30.]. Kod ekstremno jake zime 1987. u istočnoj Francuskoj došlo je do redukcija električne energije, a zahvaljujući koordiniranoj reakciji Španjolske, Njemačke i Nizozemske i Belgije, potrošači u zapadnoj Francuskoj i u ostatku UCPTE-a nisu osjetili poremećaj, a taj se slučaj koristi kao oprimjerenje učinkovitog odziva na poremećaj u elektroenergetici [3, str. 12].

<sup>77</sup> Između BDP-a i potrošnje od 1980. do 1987.  $R^2$  bio je 0,17, od 1954. do 1979.  $R^2$  bio je 0,98.

<sup>78</sup> Pogledati: Milan Ivanović (1988.), »Tržište i politika cijena električne energije u vrijeme energetske i ekonomske krize u Jugoslaviji«, *Ekonomski vjesnik : Review of Contemporary Entrepreneurship, Business, and Economic Issues*, Vol. I No. 2, članci Hrvoja Požara za *Večernji list* (19. 4. 1986., Br. 8189, str. 10.; 8. 12. 1984., Br. 7773, str. 4.), Miodrag Šajatović, *Večernji list*, 30. 3. 1985. (Br. 7867., str. 8. i 9.), Jure Šimović, *Elektroprivreda i privredni razvoj*, *Večernji list*, 4. 5. 1985., Br. 7895, str. 31. Jure Šimović (r. 1940.) je doktorirao ekonomiju i bio je znanstveni suradnik Instituta za elektroprivredu u Zagrebu (1980–81), <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=59553>, pristup 26. 5. 2023.

zavjese [1, str. 108., 112.], a podrška za elektroenergetskim povezivanjem Skandinavije bila je i od stanovništva i od politike [2, str. 28.-9.]. Zasiurno je *Drugi svjetski rat* ostavio posljedice na međusobno povjerenje<sup>79</sup>; države UCPTE-a bile su zaraćene strane u *Drugom svjetskom ratu* (stoga je razumljivo bilo kao cilj postaviti povećanje međusobnog povjerenja); u slučaju Jugoslavije zaraćene strane su se našle u istoj državi (promovirala se sintagma »bratstvo i jedinstvo«); skandinavske države nisu ratovala međusobno u *Drugom svjetskom ratu*. Radivoj Marković za razdoblje iz 60-tih i 70-tih govori da su »[o]dnosi između elektroprivreda pojedinih republika bili su usklađivani u JUGEL-u. Vrlo često na sastancima dolazilo je do svađa i nadmudrivanja« [17]. Za cijene međurepubličkih razmjena Dragutin Stanić 1980. piše: »Podaci pokazuju da Hrvatska svoje viškove u navedenim godinama zaista plasira po smiješno niskim cijenama, sigurno znatno ispod tržišne vrijednosti te energije«<sup>80</sup>. Boro Soleša 1984. piše »Kako postići da jugoslavenskim elektroprivrednicima ne bude zajednička samo elektromreža nego i razvoj pa i dohodak da se ne bi događalo da jedna republika ili pokrajina „zarađuje“ na drugoj?»<sup>81</sup>. Miodrag Šajatović<sup>82</sup>, u surječju kršenja dogovora oko isporuke električne energije iz elektrana, u koje je Hrvatska investirala u drugim republikama (npr. neisporuka iz elektrane Tuzla IV tjednima), 1985. piše: »[n]epročišćeni računi iz prošlosti bit će velika prepreka u dogovorima kako zajednički najpovoljnije koristiti energetske resurse u zemlji, umjesto da svaka republika ili pokrajina gradi kod sebe koliko treba, bez obzira na buduću cijenu kilovata«. Tu je navodio primjer Makedonije gdje su ispale sve termoelektrane, stoga su joj u pomoć priskočile Slovenija, Hrvatska, Srbija te Bosna i Hercegovina, a istoga je dana JUGEL-ova strana priče iznesena spominjanjem: »„samovoljnog ponašanja pojedinih republika i pokrajina“, nekorektnog ponašanja i zakašnjelih intervencija«. Skupština Jugoslavije, na poticaj Slovenije, donijela je odluku o moratoriju na izgradnju nuklearnih elektrana, čime se dovelo u pitanje izgradnju NE Prevlaka u Hrvatskoj, koju su Hrvatska i Slovenija trebale zajednički graditi [5, str. 135.]. Goran Granić<sup>83</sup> je 1990. napisao: »Za samo nekoliko dana uspjeli smo iz jednog glomaznog sistema, koji je po svojoj organizaciji više sličio društveno-političkoj zajednici nego ekonomskom sistemu, prijeći na

---

<sup>79</sup> Za posljedice *Prvog svjetskog rata* pogledati: Maria Hidvegia, Nikolaus Wolf (2018.), »Power failure: the electrification of Central-Eastern Europe, 1918–39«, *European Review of History: Revue européenne d'histoire*, [https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/38393/Power\\_failure\\_the\\_electrification\\_of\\_Central\\_Eastern\\_Europe\\_1918\\_39\\_u.pdf;jsessionid=70961F9C3C5C84A6D0F6E80FBAFD3070?sequence=1](https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/38393/Power_failure_the_electrification_of_Central_Eastern_Europe_1918_39_u.pdf;jsessionid=70961F9C3C5C84A6D0F6E80FBAFD3070?sequence=1), pristup 29. 12. 2022.

<sup>80</sup> Dragutin Stanić (1980.), »Poteškoće i slabosti u funkcioniranju elektroenergetskog sistema Hrvatske«, *Energija* God. 29 (1980) br. 3-4, 105-120.

<sup>81</sup> *Slobodna Dalmacija*, 31. 10. 1984. str. 10.

<sup>82</sup> *Večernji list*, 23. 2. 1985. (Br. 7837, str. 8. i 9.).

<sup>83</sup> Goran Granić (r. 1850.), radio je u Institutu za elektroprivredu od 1973. do 1987., od 1987. do 1990. kao direktor i član Poslovnog odbora za razvoj u Zajednici elektroprivrednih organizacija Hrvatske.



tipični zapadni način vođenja poduzeća»<sup>84</sup>. Socijalistička načela u međurepubličkim razmjenama električne energije nisu doprinosila povjerenju među republikama u Jugoslaviji. Slično se odnosilo i na međupodručne razmjene, primjerice kada se državnom intervencijom ZEPH od 1965. do 1968. razdvajao na tri područna poduzeća (Rijeka, Zagreb i Split), gdje su se elektrane građene zajedničkim novcem uglavnom iz Zagreba, odjednom našle izvan zagrebačkoga područja te prešle u riječko i splitsko područje od kojih je Zagreb trebao kupovati elektroenergiju, što je izazivalo trvenja među trima područjima<sup>85</sup>. Šajatović 1985.<sup>86</sup> piše i o međudržavnim razmjenama jugoslavenskog sustava prema UCPTE-u: »Jugoslavija često „povlači ispomoć“<sup>87</sup> pa se svakog trenutka moglo dogoditi da nas se „otkači“ kako ne bismo ugrozili cijeli sistem. Do toga, na sreću, ipak nije došlo, inače bi Jugoslavija u relativno kratkom razdoblju doživjela i treći „elektroenergetski kolaps“<sup>88</sup>«, a slično piše za međudržavne razmjene između Jugoslavije i CDU VERE-a: »„neovlašteno posuđivanj[e]“ energije« gdje je »mimo dogovora« Rumunjska uzimala električnu energiju iz Đerdapa.

Godine 1952. mađarski se sustav povezuje s čehoslovačkim prilikom čega se pojavio problem s održavanjem ugovorene razmjene, a iste se godine Moskovska konferencija zalaže za razmjene električne energije sa zapadnom Europom. Zbog poteškoća u individualnom upravljanju tokovima energije i u Mađarskoj, osniva se, uz podršku SSSR-a, 1963. godine CDU VERE [13, str. 233.-4.]. Između Mađarske i Ukrajine je 1969. izgrađen 400 kV-tni vod (privremeno pod 220 kV-ti) zbog znatnih mađarskih potreba za energijom [13]. Izgrađen je 1978. godine 750 kV-tni vod između Mađarske i Ukrajine, koji je doveo do sinkronog rada dvaju sustava i namirenja mađarskih potreba za energijom, a pogodnost je bila i u tome što su planovi područja koja su udaljena tisućama kilometara bili vremenski pomaknuti (neistovremena vršna opterećenja, smanjenje satne varijabilnosti svesustavske potrošnje), osim toga je donio mogućnost smanjenja potrebne rezerve snage [13, str. 237.-8. i 241.]. Bugarski sustav je od točke gdje je bio uvoznik električne energije 750

<sup>84</sup> *Večernji list*, 14. 8. 1990. (Br. 9693, str. 3.), pogledati i *Večernji list* 29. 8. 1990. (Br. 9708, str. 23.).

<sup>85</sup> *Večernji list*, 24. 4. 1969. (Br. 3011).

<sup>86</sup> *Večernji list*, 23. 2. 1985. (Br. 7837, str. 8.-9.).

<sup>87</sup> Drugdje koristi sintagmu »„ilegalno“ posuđivanje struje«, to je vjerojatno blisko modernom pojmu »kompenzacija nenamjernih odstupanja« po principu energija za energiju.

<sup>88</sup> Pogledati: o raspadu jugoslavenskog sustava **12. 7. 1984.** {*Večernji list*, 14. 7. 1984. (Br. 7650, str. 3.)}, o raspadu jugoslavenskog sustava **1. 8. 1986.** {*Večernji list*, 2. 8. (Br. 8276, str. 3.), 7. 8. (Br. 8280, str. 5.), 8. 8. 1986. (Br. 8281, str. 4.)}, *Energija*, god. 36 (1987) 2, 107-119}, razdvajanje jugoslavenskog sustava **24. 7. 1987.** na istočni, i na zapadni koji je radio s dijelom talijanske mreže odvojene od UCPTE-a {*Energija*, god. 38 (1989) 4, str. 301.-308., *Energija*, god. 36 (1987) 2, 121-125, *Energija*, god. 36 (1987) 2, 107-119}, **6. 7. 1988.** raspad UCPTE-a i *black out* zagrebačkog područja, **12. 7. 1988.** *black out* sistema Istok {*Energija*, god. 38 (1989) 4, str. 301.-308.}, o razdvajanju **6. 7. 1988.** {*Energija*, god. 38 (1989) 4, str. 301.-308.}, o razdvajanju te djelomičnom raspadu **6. 8. 1988.** {*Energija*, god. 38 (1989) 6, 467-475.}.

kV-tnim vodom iz SSSR-a, postao izvoznik električne energije u susjedne sustave (*energy hub*) [21, str. 131.-57.]. Dostupna je shema visokonaponske mreže s početka 80tih od istočnoeuropskih država do uključivo Sibira, gdje je SSSR-ova mreža bila upravljana centralizirano za razliku od UCPTE-ove mreže. Druga je razlika u odnosu na UCPTE-e, što su države UCPTE-a bile usredotočene na prijenos unutar vlastitih granica, a SSSR-ov sustav se usredotočio na prijenos električne energije preko granica područja višim naponom (UCPTE 380 kV, SSSR 750 kV), budući da se 90% proizvodnje električne energije nalazilo daleko od potrošačkih središta [3, str. 16.-7.]. Navedeno oslikava tehničke mogućnosti razmjene električne energije između CDU VERE-a i SSSR-a, što je, imajući u vidu povezanost CDU VERE-a i Jugoslavije, moglo imati utjecaj na razmjenu električne energije između Jugoslavije i CDU VERE-a (npr. utjecaj iz SSSR-a posredno preko Mađarske, Bugarske i Rumunjske – *nesusjedna razmjena*).

Postojao je u Jugoslaviji međurepublički način razmjene koja je išla po principu energija za novac, a nije sasvim jasno je li država u narednom primjeru iz 1957. određivala cijene međurepubličkih razmjena. Naime, sklopljen je novi ugovor između Hrvatske te Bosne i Hercegovine o razmjeni električne energije za 1957., iz razloga jer je Jugoslavija definirala jedinstvene cijene za »za veleprodajne potrošače u FNRJ« (op. za međurepubličke razmjene?). Jedna republika je mogla napajati potrošače, koji su joj teritorijalno bliski, u drugoj republici, no tako da će nakon »saldiranja razmjene« Hrvatska po cijeni od 3,28 dinara/kWh preuzeti 313 MWh u 1957., a za energiju koju preuzme iznad toga cijena će biti 2,75 dinara/kWh<sup>89</sup>.

U kontekstu povezivanja Grčke s Jugoslavijom, bilo je 1957. isticano da se razmjena ne će vršiti prema principu energija za novac, nego prema principima energija za energiju (*returns, balancing*<sup>90</sup>). Indikativan je odjek toga u grčkim novinama gdje je napisano da plaćanja ne će biti u novcu (*No payment in currency*). Iako, Grčka je za razmjene u hladnoratovskom razdoblju koristila način nadoknade po principu energija za energiju, energija za robu, a čak i princip energija za novac<sup>91</sup>. U razdoblju od 1961. do 1995. Grčka je uvozila električnu energiju kroz Jugoslaviju iz Rusije i Italije, kroz Albaniju iz Švicarske, a putem Bugarske iz Austrije [21, str. 165., 169., 174.].

Vod između Hrvatske i Mađarske izgrađen 1957. služio je za međudržavni plasman viškova hidroelektrične proizvodnje iz Bosne u Mađarsku [6], što podrazumijeva da se stanje s hidrologijom u Bosni odrazi na izvoz iz Hrvatske u Mađarsku (*neizravna razmjena* za mađarski sustav). Tim

---

<sup>89</sup> *Energija* VI. (1957), br. 7-8, str. 238.

<sup>90</sup> »...the use of this connection was not to involve any currency payment, but merely an exchange of electricity through balancing and returns«.

<sup>91</sup> »Greece was constantly importing electricity from its Cold War neighbors. To pay for this it gave other goods and even currency«.

prekograničnim vodom nije bio omogućen sinkroni pogon s Mađarskom, već se po potrebi dio mađarske potrošnje prebacio na jugoslavenski sustav što je bio čest slučaj, kao i obratno, što je bio rjeđi slučaj [9, str. 197.]. Zaključen je ugovor o »prodaji i razmjeni električne energije« između JUGEL-a, i Uprave za elektroprivredu pri mađarskom ministarstvu teške industrije (VIPG). Mađarska je, prema svojim mogućnostima, trebala u skladu s tim sporazumom ispomagati Jugoslaviju ako bi ona imala nestašice elektroenergije<sup>92</sup>. Tako je bilo i kada je 1969. izgrađen novi 110 kV-tni vod između Mađarske i Hrvatske (npr. Varaždin u otočnom pogonu spojen na mađarski sustav) [5, str. 112.]. Između Austrije (Wien) i Mađarske (Győr) je 1968. bio 220 kV-tni vod gdje je po sličnom principu razmjenjivana električna energija, dakle bez sinkronog rada cjelokupnog austrijskog i cjelokupnog mađarskoga sustava (HVDC<sup>93</sup> pretvorba je između Mađarske i Austrije bila 1992. u *Wien Südost*) [13, str. 236.-7., 243., 253.-4.], a između Austrije i Čehoslovačke se 1963. razmjenjivala električna energija na sezonskoj razini [1, str. 181.-184.]. Zgodno se prisjetiti slučaja kada su francuski i švicarski sustav spasili talijanski elektroenergetski sustav od prisilnog gašenja tvornica (redukcija) početkom 20-tih godina XX. stoljeća, gdje je nedostajuću električnu energiju Francuska isporučivala u Švicarsku, a potom Švicarska u Italiju (*nesusjedna razmjena*) [1, str. 39.]. Drugi je način razmjena električne energije među dva nesinkronizirana područja putem visokonaponske istosmjerne tehnologije (HVDC), koja iako se u kontekstu pojeftinjenja te tehnologije spominje u literaturi za Jugoslaviju kao izgrađena, ipak nije bilo HVDC-a između Jugoslavije i CDU VERE-a (ne spominje se u hrvatskoj literaturi, ni u dijelu mađarske sinteze na engleskom<sup>94</sup>, ni u slovenskoj [14] ni crnogorskoj [15] ni bugarskoj [16]), a jest bila izgrađena za razmjenu između Austrije i CDU VERE-a (npr. između Austrije i Čehoslovačke od 1983. preko *back-*

---

<sup>92</sup> *Energija* VI. (1957), br. 9-10, str. 314.

<sup>93</sup> HVDC – *High Voltage Direct Current*.

<sup>94</sup> »Substantial change has not arrived until 1995 when the East-Central European countries that left the CDU started to run in synchrony with the UCPTE pool under the name of CENTREL while the back-to-back HVDC links of 600 MW each installed in the Etzenricht, Dürnröhr, and Wien Südost substations were phased out.« [13, str. 254.], lokacije Etzenricht, Dürnröhr i Wien Südost su ili u Austriji ili u Njemačkoj, a ne spominje se HVDC stanica u Jugoslaviji ni u Mađarskoj za vod prema Jugoslaviji.

to-back stanice gdje su se odvijale znatne razmjene<sup>95)</sup> <sup>96</sup> [1, str. 191.-4.]<sup>97</sup>. Prema članku Marijana Kaleae<sup>98</sup> objavljenom 1988. u časopisu *Energija*, na temelju radova iz 1985. i 1984. je na shemi između Jugoslavije i CDU VERE-a naznačio da je HVDC tehnologija bila ili u izgradnji ili je bila planirana na dva mjesta (Mađarska-Hrvatska, Bugarska-Srbija), osim toga i između Bugarske i Grčke, dok ne spominje da je ona na jugoslavenskim granicama bila izgrađena, a na austrijskim granicama bila je izgrađena samo za razmjenu s Čehoslovačkom<sup>99</sup>. Grčka nije sa susjedima koristila HVDC tehnologiju, osim nakon *Hladnog rata* putem podmorskog kabla s Italijom, navodeći da je ta tehnologija bila skupa [21, str. 174.]. Sa HVDC spojem svaki sustav radi na svojoj frekvenciji u iznosu i vremenu, a istovremeno se razmjenjuje električna energija preko učinkne elektronike (pretvarači), bez potrebe da se dio jednog sustava prebaci u otočni pogon i sinkronizira s drugim da bi se razmjenjivala električna energija između područja. Prvi komercijalni prijenosni HVDC vod bio je 1954. između Gothlanda i Škotske<sup>100</sup>. HVDC između Austrije i Čehoslovačke bio je 1983. u pogonu [1, str. 194.-95.]. Jugoslavija je na UNIPEDE-ovoj konferenciji 1976. ukazala da joj je neprihvatljivo što jugoslavenski sustav radi u sinkronom pogonu samo s jednim europskim prekograničnim vodom u trajnom pogonu, a da se pritom druge vodove koristi samo kada je to

---

<sup>95</sup> Između Austrije i Poljske je 1975. bio potpisan dugoročni ugovor, kojim je 1983. zaključena godišnja isporuka 1,6 TWh-i iz Poljske za Austriju preko mreže ČSSR-a (op. Čehoslovačke). Od 1985. teče novi ugovor o razmjeni sa SSSR-om za isporuke ljetne i vršne energije iz Austrije, te za isporuke zimske termoenergije iz SSSR-a, čime se ostvaruju uštede goriva u oba sustava. Austrija isporučuje od svibnja do kraja kolovoza danju 590 GWh SSSR-u, a odande uzima noću 472 GWh od siječnja do kraja travnja i od 15. listopada do 15. prosinca. Ključ je, dakle, 1,25:1. Ugovor je zaključen na 20 godina. Austrija je dobivala zahtjeve za razmjenama kojima ne bi mogla udovoljiti ni HVDC stanica dvostruko veće snage od ugrađene, *Energija*, god. 38 (1989), 2, 135-143.

<sup>96</sup> »The two countries that had previously seen the least political resistance to East-West linkages, Austria and Yugoslavia, led the way. In both countries HVDC interconnections with the CDO network were built.«. Osim toga slično se spominje u Vincent Lagendijk, Frank Schipper (2016.), »East, West, Home's Best: The Material Links of Cold War Yugoslavia, 1948-1980«, str. 46.: »This was not easy because Yugoslavia wanted to be part of the Western system, but not at the expense of isolating itself from its Eastern neighbours. In the event, Yugoslavia's decision was eased by the increasing cheapness of the High Voltage Direct Current Back-to-Back interconnector, which enabled the interconnection of two synchronous AC systems, by means of a DC interconnection...By applying HVDC, the Balkan countries could choose whether they would remain synchronous with the large regional networks; thus the technology offered a way of forging East-West interconnections without large-scale adaptation of the regional systems - and avoiding a tough technical yet political decision.«, gdje se autori pozivaju na dokument UNIPEDE-a iz 1976. i dokument UCPTE-a iz 1988.

<sup>97</sup> Vincent Lagendijk elektroničkim me pismom 30. 5. 2023. obavijestio da je ponovno razmotrio reference (UNIPEDE iz 1976. i UCPTE iz 1988.) i da se ipak spominju samo planovi za korištenje te tehnologije između CDU VERE-a i Jugoslavije. Za informaciju mu se ovim putem zahvaljujem.

<sup>98</sup> Marijan Kalea (r. 1943.), predavač na *Elektrotehničkom fakultetu* u Osijeku, radio je u elektroprivrednoj djelatnosti u Jugoslaviji, a u Hrvatskoj je bio direktor u HEP-u d.d.

<sup>99</sup> Marijan Kalea (1989.), »Povezivanje elektroenergetskih sistema postrojenjima istosmjerne struje«, *Energija*, god. 38 (1989), 2, 135-143.

<sup>100</sup> [https://ethw.org/Milestones:List\\_of\\_IEEE\\_Milestones](https://ethw.org/Milestones:List_of_IEEE_Milestones), pristup 31. 5. 2021.

ekonomski isplativo. Jugoslavenski predstavnik zagovarao je bliže veze između UCPTE-a i CDU VERE-a [1, str. 197.-8.].

Inženjer Tomislav Pavlović je kao stipendist Tehničke pomoći Ujedinjenih naroda (UN) boravio 1961. u Švedskoj, Finskoj i Švicarskoj u cilju proučavanja regulacije frekvencije i snage razmjene u spomenutim zemljama. U svojem izvješću iz 1962. naziva *IZVJEŠTAJ po temi "REGULACIJA FREKVENCIJE I SNAGE U POVEZANIM SISTEMIMA"* opisao je na hrvatskom jeziku predmetnu temu kod navedena tri sustava a i za jugoslavenski, s istančanim osjećajem za bitno. U stanju iz 1962. gdje je jugoslavenski sustav imao velika odstupanja i u frekvenciji (normalno  $\pm 0,2$  Hz, a dosežalo je 1 Hz), preporučao je zapadno-europska rješenja i upozoravao da predstoji regulacija razmjene toka energije (snage) u slučaju kada se uspostavi paralelan pogon s drugim sustavima. Procijenio je da 110 i 220 kV-tni vodovi ne će biti dovoljni da se povežu s oba sustava (CDU VERE i UCPTE), nego će se raditi ili paralelno s jednim ili paralelno s drugim sustavom, a da pritom jedan dio jugoslavenskoga sustava radi odvojeno od oba. Piše da se dio mađarskoga sustava u odvojenom pogonu ponekad napaja iz Jugoslavije. Navodi da su republičke elektroprivredne zajednice prilično samostalne u eksploataciji svojih elektrana [20].

Međurepubličke razmjene u Jugoslaviji mogle su ići po principu da je jedna republika investirala u izgradnju elektrane u drugoj republici, iz koje je onda iz nje dobila udio isporučene električne energije u mrežu (načelo investicija u elektranu za energiju, npr. Hrvatska je iz *HE Dubrovnik* puštene u pogon 1965. dobivala 22% energije, a ostatak bio namijenjen za Bosnu i Hercegovinu [5, str. 109.]<sup>101</sup>), dok su nepoznate količine tako dobavljene električne energije prema potrošnji u Hrvatskoj, osim za *NE Krško* čiju je polovicu proizvodnje na godišnjoj razini u odnosima s proizvodnjom i potrošnjom moguće odrediti<sup>102</sup>. Ako jedna strana pokrije sve investicijske troškove za neku elektranu (CAPEX), i time stekne pravo na električnu energiju iz te elektrane, preostaje pokriti varijabilne troškove te elektrane (OPEX). U drugim slučajevima, investitor treba kroz prodajnu cijenu električne energije (npr. drugim republikama, drugim državama) osim varijabilnih troškova (ovisnih o proizvodnji elektroenergije, npr. troškovi goriva) pokriti i fiksne troškove (npr.

---

<sup>101</sup> Prva elektrana izgrađena sredstvima Hrvatske izvan njezina područja je termoelektrana *TE Tuzla* snage 210 MW. Kasnije se tako gradi 1976. *TE Kakanj* 100 MW, 1979. *TE Obrenovac* 300 MW i 1983. *TE Gacko* 100 MW [7, str. 75., str. 78.].

<sup>102</sup> Elektroprivredna brutopotrošnja bila je u Hrvatskoj od 1980. do 1990. od nešto manje od 12 TWh-i do nešto manje od 15 TWh-i godišnje [6, str. 46.]. Brutoproizvodnja električne energije u Hrvatskoj bila je od 1980. do 1987. između 7,6 i 9,4 TWh-a [19, str. 250.]. *NE Krško* proizvodila je od 1983. do 1990. između 3,7 i 4,5 TWh-i {Nuklearna elektrana Krško, d.o.o. (2021., rev. 3), *PROJECT: Long Term Operation of Krško Nuclear Power Plant (2023 – 2043) (The lifetime extension of Krško NPP from 40 to 60 years)*, str. 52., [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Puo/11\\_05\\_2022\\_Projekt\\_Dugorocni\\_pogon\\_NEK\\_EN.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Puo/11_05_2022_Projekt_Dugorocni_pogon_NEK_EN.pdf), pristup 30. 5. 2023.), od čega je polovica za Hrvatsku (od 1,85 do 2,25 TWh-a).

investicijske troškove). Prodajna cijena (ili dobivena razmjenska vrijednost) ne jamči nužno proizvođaču povrat svih troškova proizvodnje električne energije (CAPEX i OPEX). Sličnih je primjera bilo u UCPTE-u, gdje je primjerice iz jedne austrijske elektrane dvije trećine proizvodnje išlo za Njemačku po ugovorenim troškovima proizvodnje [11]. Kosovo i Makedonija su se 1965. dogovorile da će se na Kosovu izgraditi elektrana *Kosovo II*, iz koje je Kosovo trebalo za Makedoniju isporučivati električnu energiju (za *Železaru Skoplje*). Kasnilo se s izgradnjom elektrane, pa je srbijanski ZEP (ZEPS) isporučivao elektroenergiju Makedoniji, što je trebala biti obaveza Kosova. Za elektroenergiju koju je ZEP isporučivao Makedoniji, Kosovo je plaćalo ZEP-u po cijeni koju je ZEP primjenjivao za međurepubličke razmjene. Ali, ZEP je Kosovu za elektroenergiju proizvedenu na Kosovu plaćao po proizvodnoj cijeni, a istovremeno je ZEP Kosovu elektroenergiju za Makedoniju prodavao po nižoj cijeni. Ta je praksa kasnije ukinuta [17]<sup>103</sup>. Prema tome se čini da je ZEP tada primjenjivao jednaku cijenu za sve međurepubličke razmjene.

Međudržavne i međurepubličke razmjene su 1973. u crnogorsko-albanskom i crnogorsko-srbijanskom slučaju bile po principu energija za novac. Naime, 1973. je u Crnoj Gori bila suša te je Crna Gora imala: dnevni uvoz iz Albanije od 2 GWh, iz Srbije 0,8 GWh i iz Bosne i Hercegovine 0,18 GWh. Navodi se da je iznos za električnu energiju iz Srbije bio 10 milijuna dinara a iz Albanije je bio 9,5 milijuna dinara. Crna Gora 1976. uvozi elektroenergiju iz Italije: »Crna Gora je morala da iz Italije uvozi 1,2 miliona kWh dnevno« (neizravna razmjena), te se navodi: »[s]truja iz uvoza je plaćana po dva i po puta skupljoj cijeni od domaće«. 1982. godine »[u] vrijeme elektroenergetske krize u Crnoj Gori, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede je odlučila da se sav uvoz iz Švajcarske (op. Švicarske) usmjeri za potrebe Crne Gore, kao i pomoć Elektroprivrede Slovenije, što je omogućilo ostanak na trećem stepenu restrikcija.«. Zanimljiv je još jedan događaj iz crnogorskoga konteksta: »[z]bog odustajanja od gradnje HE na Tari i odluke Ustavnog suda Jugoslavije, predstavnici savezne i republičkih vlada, donijeli su u septembru 1987. godine na Cetinju, odluku da Crnoj Gori sve jugoslovenske republike i pokrajine ukupno godišnje isporučuju 970 miliona kWh električne energije, jer je Crna Gora odustala od svake gradnje HE na Tari. Taj sporazum nije realizovan.« [15, str. 163.-5., 169., 182.].

Samo je na jednom mjestu u jugoslavenskom slučaju pronađeno da su razmjene elektroenergije bile po principu energija za robu: 1985. zabilježena je međudržavna razmjena s

---

<sup>103</sup> Direktor željezare Skoplje, Minčo Jordanov, je 2. kolovoza 1989. (Br. 9323, str. 17.) *Večernjem listu* dao intervju. Bunio se na veću cijenu koju je plaćao za električnu energiju u odnosu na cijenu po kojoj se električna energija isporučuje drugima, iako su oni investirali u elektrane na Kosovu. Primjećuje sljedeće: »Čini se da se u nas stalno ide iz jedne u drugu krajnost. Najprije smo imali državno-centralističku privredu koja praktički nije marila za ekonomsku logiku privređivanja. Sada idemo na neki, ja bih to nazvao neoliberalistički koncept, u kojemu uopće nema države«.

Čehoslovačkom po principu elektroenergija za kukuruz iz Vojvodine<sup>104</sup>. Inače su pregledani materijali, osim u rijetkim slučajevima, ograničeni samo na cijene koje plaćaju potrošači, stoga su članci kao što je prilog Dragutina Stanića iz 1980. dragocjeni. Stanić je 1980. napisao članak koji sveobuhvatno razmatra odnose između cijena međurepubličkih razmjena i cijena koje plaćaju potrošači, a u njemu se govori o međurepubličkim razmjenama po principu energija za novac. Govori se, na primjeru 1977. i 1978., da su cijene u međurepubličkim razmjenama po kojima je Hrvatska dobivala novac za izvoz bile ispod tržišne vrijednosti te energije, uspoređujući ih pritom s cijenama po kojima su u međurepubličkim razmjenama druge republike prodavale energiju<sup>105</sup>. Piše da: »[s]vaka republička elektroprivreda nastoji koliko-toliko zaštititi vlastite potrošače, pa povećane troškove u većoj mjeri prebacuje na susjede, naročito u kriznim situacijama. Premda su BiH i Srbija u odnosu prema drugim republikama u bitno drugačijoj situaciji s obzirom na mogućnost kontinuirane i garantirane opskrbe drugih sistema, ipak bi i kod povremenih isporuka trebalo više voditi brige o stvarnoj tržišnoj vrijednosti električne energije.«<sup>106</sup>.

U Jugoslaviji je vladalo načelo po kojemu je svaka republika zadužena za osiguravanje električne energije za sebe. To se osim gradnje elektrana u vlastitoj republici osiguravalo gradnjom elektrana na teritorijima druge republike, čija je proizvodnja u dijelu ili u cijelosti bila namijenjena za namirenje potrošnje u vlastitoj republici. Navedeno je osiguravala i izgradnjom prijenosnih vodova na svojem teritoriju a i izgradnjom prijenosnih vodova na teritoriju drugih republika. Viškovi proizvedene električne energije su se raspodjeljivali među drugim jugoslavenskim republikama i u inozemstvu preko republičkih dispečera<sup>107</sup>, a putem ZJE-a (op. JUGEL-a) je

---

<sup>104</sup> *Večernji list*, 23. 2. 1985. (Br. 7837, str. 8. i 9.).

<sup>105</sup> RH prodaje u 1977. za 21,55 a u 1978. za 30,61; BiH po 42,17 i 47,93; Slovenija 41,11 i 151,76; Srbija 35,51 i 37,52; Makedonija 53,64 i 49,19 p/kWh.

<sup>106</sup> Također je ukazivao: »Kako kućanstva u Hrvatskoj plaćaju za izgradnju elektroenergetskih objekata i doprinos na potrošnju od 23 p/kWh, to ukupna cijena po kWh iznosi u 1977. godini 105,44, a u 1978. godini 115,04. U drugim republikama je i doprinos na potrošnju neusporedivo niži, pa stvarno povećanje cijena u kućanstvu Hrvatske iznosi i do 70% u odnosu prema drugim republikama. Kod cijena električne energije u međurepubličkoj razmjeni prisutna je suprotna pojava i drugačija logika.«, međutim nije precizirao što mu znači »suprotna pojava i drugačija logika«.

<sup>107</sup> Dispečer je uloga u elektroenergetskom sustavu koja donosi odluke o pogonskom stanju mreže (npr. uklapanje/isklapanje dalekovoda), odluke o planiranom radu elektrana po satima na temelju tehno-ekonomskih kriterija, dogovara razmjene elektroenergije s drugim sustavima (s drugim republikama, s drugim državama), osigurava rezervu djelatne snage za pogonske potrebe, nalaže elektranama promjene u isporuci toka energije u mrežu tijekom pogona (npr. za otklanjanje manjkova/viškova električne energije, otklanjanje preopterećenja dalekovoda). U modernom smislu dispečer ne odlučuje o planiranom radu elektrana po satima na temelju tehno-ekonomskih kriterija niti dogovara razmjene s drugim sustavima, nego se isto prepušta tržišnim dionicima, odnosno navedeni poslovi nisu u djelokrugu rada modernog operatora prijenosnog sustava. Moderni operator prijenosnog sustava intervenira ako tržišni ishod u smislu rada elektrane ugrožava siguran pogon mreže, a za prekogranično trgovanje *ex ante* u europskoj paradigmi (*zonal pricing*) postavlja ograničenja u vidu količine prekograničnih kapaciteta.

vršena dodatna dobava elektroenergije. Srbijski elektroinženjer Miroslav Jovanović<sup>108</sup> smatrao je da su takva načela vodila u ekonomsko i najvećim dijelom razvojno zatvaranje republičkih elektroprivreda u sebe. Nadalje, po njemu je takovom organizacijom onemogućen najracionalniji opseg investicija u elektrane i prijenosni sustav, čime je po njemu spriječeno postizanje minimalizacije troškova prijenosa i proizvodnje električne energije na jugoslavenskoj razini<sup>109</sup>, a i da je, po njemu, s time razbijeno jedinstveno jugoslavensko tržište električne energije<sup>110</sup>. Prije 1963. se na inzistiranje Hrvata i Slovenaca, kasnije uz podršku bosanskohercegovačkoga stanovništva, išlo u decentralizaciju upravljanja elektroenergetskoga sustava [17]. Od 1. srpnja 1965. odgovornost za razvoj i rad elektroenergetskoga sustava preteče s jugoslavenske države na njezine republike<sup>111</sup>. Očito su postojala dva uvjerenja o potrebnoj razini centralizacije jugoslavenskoga elektroenergetskoga sustava, a kao i u UCPTE-u i među austrijskim republikama, pobjednička ideja u Jugoslaviji bila je ideja decentralizacije sustava. Inače, euroazijski sustavi su skloni centralizaciji a zapadnoeuropski decentralizaciji<sup>112</sup> (supsidijarnost, pogledati opise zapadnoeuropskih i sovjetskog sustava na drugom mjestu u radu). Nadalje, prema prethodno navedenom, imajući u vidu da se električna energija iz jedne republike pridruživala drugoj po principu investicija u elektranu za energiju (npr. investicija Hrvatske u *Tuzla IV*), smanjena je količina električne energije koju je jedna republika mogla prodati drugoj po principu energija za novac.

Hrvatski dispečeri Marko Lovrić, Mićo Klepo i Ivica Toljan dali su mi informacije o razmjenama električne energije u Jugoslaviji (u prilogu) iz kojih je u nastavku složen narativ, s označenim dopunama.

Najkasnije od sredine 70tih razmjene električne energije mogle su ići po principu energija za energiju. Primjerice, jedna republika izvozi 2,5 MWh električne energije noću, a zauzvrat dobije 1 MWh električne energije danju – najviši omjer je bio 1:2,5 dok su ostali bili 1:1, 1:1,5, 1:2 i tako dalje.

---

<sup>108</sup> Miroslav Jovanović (r. ?), srbijski inženjer (dipl. ing.) koji je bio od značaja za elektroprivredu u Srbiji za vrijeme Jugoslavije.

<sup>109</sup> Prijenosna mreža na teritoriju Hrvatske građena je kao podsustav prijenosne mreže Jugoslavije, stoga njezina konfiguracija nije rađena optimalno po brojnim kriterijima, pogledati: Ranko Goić, Marko Lovrić, Zorko Cvetković (2001.), »Gubici električne energije u prijenosnoj mreži HEP-a«, *Energija*, 5 (2001), 349-359, str. 3.

<sup>110</sup> Miroslav Jovanović (2004.), »JOVAN JANKOVIĆ – Skoca za studiju«, Beograd, <http://www.zapisioelektroprivredi.rs/velikanielektroprivrede>, pristup 13. 12. 2022.

<sup>111</sup> *Energija* God 30 (1981) br. 7-8, 263-272. Glavni dispečer *Zajednice jugoslavenske elektroprivrede* (JUGEL) imao je ulogu u provedbi ekonomskih načela, utječući na razmjenu električne energije između elektroprivrednih zajednica, potičući proizvodnju jeftinije električne energije i njen prijenos u područja s višom proizvodnom cijenom (op. nije navedeno kojim načinom se to poticalo te kako su se provodila ta ekonomska načela i kako su definirana). Takva organizacija traje do 1965. [6, str. 73.].

<sup>112</sup> Stipe Kljajić (r. 1980.), doktor povijesti i docent s *Hrvatskog instituta za povijest*, u serijalu *Hrvatske povijesne istine*, 2. 12. 2022., [https://www.youtube.com/watch?v=Cgv9zuAX\\_Ow](https://www.youtube.com/watch?v=Cgv9zuAX_Ow), od 6:25, pristup 14. 12. 2022.



Godine 1974. postojalo je tržište električne energije na kojemu su međurepubličke razmjene išle po principu energija za novac, gdje su se cijene određivale međurepubličkim dogovorima, a dogovori su se okončavali kratkoročnim sporazumima. Često bi kupoprodaja išla noću, potvrđivala se »depešama« a onda bi se kasnije išlo na formalizaciju dogovora i plaćanje troškova za energiju. Sve do nekoga trenutka međurepubličke i međudržavne razmjene su išle preko središnje jugoslavenske organizacije JUGEL, a najkasnije su 1985. republike mogle samostalno kupovati, prodavati (energija za novac) i zamjenjivati električnu energiju (energija za energiju), kako međusobno tako i s drugim državama, dok je tehnička koordinacija i plaćanje za energiju išlo preko JUGEL-a. Za 1986. je u kontekstu cjelokupnog jugoslavenskog sustava dostupan trag koji govori upravo o razmjeni i po principu energija za energiju i po principu energija za novac<sup>113</sup>. Švicarski EGL u Laufenbergu bio je veliki partner države Jugoslavije u kontekstu međudržavnih razmjena energije. Postojao je inženjer za planiranje sutrašnjeg dana (*day ahead dispečer*) koji je po iskustvenoj metodi prognozirao potrošnju po satima. Predviđenu potrošnju je popunjavao raspoloživim mu domaćim izvorima. Nedostajuću energiju nabavljao je po drugim republikama ili u drugoj državi, slično ako je bilo viška energije. Tu treba imati u vidu razmjene po ranije navedenom principu investicija u elektranu za energiju. Pristup Hrvoja Požara (»metoda konstantne i varijabilne energije«) bio je više teoretski jer je *day ahead dispečer*, kod slaganja elektrana, radio više iskustveno. Postojao je u Hrvatskoj program Instituta za elektroprivredu namijenjen za planiranje u današnjem danu za sutrašnji dan, za kojeg se 1988. osoblje obučavalo u hrvatskom *Republičkome dispečerskom centru*<sup>114</sup>. Svoj je plan inženjer za planiranje sutrašnjeg dana slao do 13:00 u hrvatsko dispečersko središte.

Tijekom samoga pogona provodile su se procedure kojima se uravnoteživao elektroenergetski sustav. Navedeno se odnosi na doprinos jugoslavenskoga sustava zajedničkoj frekvenciji i na istovremeno održavanje programa razmjene snage (*control program*) jugoslavenskoga sustava s drugim sustavima (sekundarna regulacija, tercijarna regulacija). JUGEL, čije je središte bilo u Beogradu, utvrđivao je zajedničku grešku jugoslavenskoga sustava, kao i odstupanja pojedinog republičkog područja, te slao signale u republička središta koji su ulazili u sustav sekundarne regulacije. Navedenu su zadaću u Hrvatskoj obavljale elektrane *HE Zakučac*, *HE Senj* i *HE Vinodol*. Ako tri navedene elektrane nisu mogle izvršiti zadatak, izravnim se nalogima elektranama (ili velikim potrošačima), za povećanjem ili za smanjenjem snage, otklanjala pogreška (tercijarna regulacija). Ako ni to nije pomagalo, onda su se međurepubličkim dispečerskim dogovorom vršile razmjene po principu energija za energiju (do 1:2,5). Bilo je slučajeva kada je Jugoslavija UCPT-e, ako nije

---

<sup>113</sup> »Višak električne energije je iskorišten da bi se vratila pozajmljena struja, a jedan je dio prodan inozemnim naručiocima«, *Večernji list*, 22. 6. 1988. (Br. 8930, str. 3.).

<sup>114</sup> *Energija*, god. 37 (1988) 5, 457-465.

imala dovoljno energije, namjerno prijavljivala nižu potrošnju od dobivene prognoze, pa je posljedično, kada se u stvarnosti pojavila stvarna potrošnja, Jugoslavija povlačila od UCPTE-a više energije od dogovorenog (npr. 400 MWh u satu, razlika između izmjerene razmjene energije i programa razmjene). Slično je za slučaj kada je Jugoslavija imala previše hidroenergije pa je prijavljivala nerealno visoku potrošnju, pa je onda u pogonu isporučivala više električne energije od dogovorenog (npr. 400 MWh po satu umjesto da je voda u hidroelektranama prelijevana). U konačnici su se te razlike nadoknađivale po principu energija za energiju, preko plana satne kompenzacije za sljedeći tjedan po tarifnim grupama. Takav neuredan rad uočavali su u UCPTE-u, pogotovo ako su takve namjerne neravnoteže dovodile do poremećaja u frekvenciji UCPTE-a, nakon čega je JUGEL dobivao oštre kritike. Prethodno navedeno se odnosi na djelatnu (radnu) energiju, međutim Jugoslavija je stvarala probleme UCPTE-u s dugotrajnim preuzimanjem prekomjernog toka jalove energije, zbog čega je Austrija barem u jednom slučaju prekinula elektroenergetsku vezu s jugoslavenskim elektroenergetskim sustavom<sup>115</sup>.

Krajem promatranog razdoblja (1989.), u surječaju s puštanjem u rad elektrane *HE Dubrava*, predsjednik jugoslavenskog *Saveznog izvršnog vijeća* Ante Marković (r. 1924.) deklarirao je u uvjetima »neefikasnosti privrede, kapitala, investicija i rada«<sup>116</sup>, da je rješenje potrebno tražiti u uspostavi jedinstvenog jugoslavenskog tržišta kao dijela svjetskog tržišta, na kojemu mora postojati konkurencija svih vrsta vlasništva, radnika i neradnika<sup>117</sup>. Goran Granić je, kako je i ranije navedeno, 1990. svjedočio promjeni načina vođenja elektroenergetskog sustava na zapadni način<sup>118</sup>, što bi značilo da prethodno nije radio prema zapadnom načinu. Funkcioniranje sustava prema zapadnim načelima rada sustava očito treba razlikovati od uspostave tehničkih preduvjeta za uspostavu paralelnog pogona elektroenergetskih sustava i od postojanja samih razmjena električne energije između sustava. Tako su Mađari 1990. iskazali namjeru za sinkronim radom s UCPTE-om, kada je započeo proces ispunjenja tehničkih, ekonomskih i organizacijskih kriterija da bi se uspostavio paralelni pogon, koji je počeo s pokusnim radom 1995. [13, str. 242.-3., 256.], a kako je ranije pokazano razmjene električne energije između Jugoslavije i ostatka UCPTE-a, kao i Mađarske s UCPTE-om, postojale su i ranije, a Jugoslavija je bila u sinkronom pogonu s UCPTE-om od sredine

---

<sup>115</sup> Prijenos djelatne električne energije bio je ograničen neodgovarajućim tokom jalove energije (npr. protivno pravilima povlačenje više od 300 Mvar-a) i kod raspada sustava 1986., o čemu je pisao Zdenko Tonković, *Energija*, god. 36 (1987) 2, 107-119.

<sup>116</sup> Pogledati modernu ocjenu socijalističkih sustava gdje se, s vremenskim odmakom, zaključuje o njihovoj neučinkovitosti: Igor Dekanić, Stevo Kolundžić, Daria Karasailović (2002.). *Stoljeće nafte – Veza između nafte, novca i moći koja je promijenila svijet*, Naklada Zadro, str. 288.

<sup>117</sup> *Večernji list* 22. 7. 1989. (Br. 9313, str. 3.), dva su članka jedan kraj drugoga.

<sup>118</sup> *Večernji list*, 14. 8. 1990. (Br. 9693, str. 3.), pogledati i *Večernji list* 29. 8. 1990. (Br. 9708, str. 23.).

70-tih godina, za razliku od Mađarske koja nije bila do kraja promatranog razdoblja. U literaturi se navodi da je u slučaju UFIPTE-a (*Franco-Iberian Union for Coordination and Transport of Electricit*, Portugal, Španjolska i Francuska), osnovanog 1963., njihov sinkroni rad s UCPTE-om od 1964. prikrivao njihovu institucionalnu fragmentaciju u odnosu na UCPTE-a, sve dok ta organizacija nije postala punopravni član UCPTE-a 1987., kada je punopravnim članom postala i Jugoslavija, a uslijed postojanja diktatorskih režima u Portugalu i Španjolskoj [3, str. 19.].

Unutar Hrvatske elektroprivrede (HEP) je 1991. po prvi puta uspostavljena jedinstvena funkcija prijenosa električne energije i vođenja elektroenergetskog sustava u istoj organizacijskoj jedinici: *Direkciji za prijenos i upravljanje*. Također su integrirana bivša područna poduzeća u jedinstvenu organizacijsku cjelinu [6]. *Direkcija za upravljanje i prijenos* bavila se međuostalim optimalnim rasporedom proizvodnje električne energije u elektranama, kupnjom i prodajom električne energije<sup>119</sup>. To govori da to što je uspostavljeno, ranije nije postojalo, barem ne na takav način.

#### 4. Zaključak

Postojali su živopisni međurepublički i međudržavni odnosi u kojima nije cilj bio samo tehnološki iskoristiti potencijale za proizvodnju električne energije te ih međusobno povezati, kako bi se sinergijskim učinkom raznovrsnih izvora (termoelektrane, hidroelektrane) omogućio prijenos električne energije od proizvođačkih točaka do potrošačkih točaka na optimalan način, nego je postojao i tehnopolitički sloj prilikom odlučivanja o korištenju tehnologije u prostoru<sup>120</sup>.

Iz iznesenoga u ovome radu nije moguće precizno periodizirati kada je koja mogućnost s naslova međurepubličkih i međudržavnih razmjena bila prisutna, iako su konture ugrubo ocrtane i potvrđene. Navedeno bi arhivskim istraživačima moglo usmjeriti pozornost na dokumente čiji bi sadržaj dodatno razjasnio način odvijanja razmjena električne energije<sup>121</sup>.

---

<sup>119</sup> *Energija*, god. 41 (1992) 5, str. 253-263.

<sup>120</sup> Grčka je umjesto izgradnje nuklearne elektrane, odlučila uspostaviti dobavu električne energije iz Bugarske, s ciljem razvijanja diplomatskih odnosa sa socijalističkim sustavom, kako bi imala alat u ruci za pregovore oko Cipra sa zapadom [21, str. 168.].

<sup>121</sup> Za informacije o arhivima u Srbiji pogledati: Saša Ilić (2020.), »Elektroprivreda socijalističke Jugoslavije izvori za ekonomsko-istorijsko izučavanje, s osvrtom na dostupnu literaturu«, Centar za ekonomsku istoriju, Institut ekonomskih nauka u Beogradu, <https://www.library.ien.bg.ac.rs/indeks.php/zb/article/download/1342/1126/>, pristup 23. 12. 2022. Elektroničkim pismom od 26. prosinca 2022. obavijestio me o moćnosti da je o najvažnijim projektima međunarodne razmjene raspravljala *Komisija za ekonomska pitanja pri CK Saveza komunista Jugoslavije*, čiji se fond nalazi u Arhivu Jugoslavije. Redovna međunarodna razmjena mogla je biti verificirana u *Saveznom izvršnom veću*, odnosno u nadležnim saveznim tajništvima (za energiju, za vanjsku trgovinu i sl.). Navodi da su ti arhivski fondovi dostupni za istraživanje. Ovim putem mu se za informacije zahvaljujem.

Razlika između modernog sustava međudržavnih razmjena električne energije gdje prevladava pristup energija za novac, zamislivo je da bi jugoslavenskim međurepubličkim razmjenama prevladavao princip investicija u elektranu za energiju, zatim princip energija za energiju i potom princip energija za novac. Prežetak principa investicija u elektranu za energiju je moderni uvoz u Hrvatsku iz elektrane *NE Krško* u Sloveniji, sa svojom znatnom količinom energije za hrvatske potrebe. Navedena dva principa postojala su i zapadno od *Željezne zavjese* kod međudržavnih razmjena električne energije, a nije utvrđen prošireni razmjerni za količine koje su se razmjenjivale prema različitim pristupima. Pronađen je za Jugoslaviju trag s principom energija za robu (kukuruz).

Postojao je slobodnotržišni sustav razmjena između austrijskih republika, i na strani dobave električne energije i na strani određivanja cijena za potrošače, a isto se ne može reći za sustav razmjena i određivanja cijena električne energije u slučaju jugoslavenskih republika.

Jugoslavija, pa time i Hrvatska, zaostajala je u razvoju međudržavnih razmjena električne energije, usporedi li se s razvojem koji je postignut u zapadnoeuropskim državama u okviru UCPTE-a, a slično se odnosi na dinamiku iskorištavanja dostupnih jugoslavenskih hidropotencijala. SAD je bio zainteresiran za osiguravanje samodostatnosti jugoslavenskoga elektroenergetskoga sustava te je u hladnoratovskom razdoblju pružao pomoć Jugoslaviji u tome smislu, kako bi, na njezinom primjeru, drugim socijalističkim prostorima pokazao put u svoju orbitu, a i SSSR je u hladnoratovskom nadmetanju u okviru svoje tehnopolitike bio zainteresiran za utjecaj na jugoslavenskom prostoru<sup>122</sup>.

Austrija je, u promatranom razdoblju, s Čehoslovačkom primjenjivala istosmjerno/izmjeničnu visokonaponsku pretvorbu (HVDC) za razmjenu električne energije između UCPTE-e i CDU VERE-a (HVDC između Austrije i Mađarske bio je od 1992.). Navedena HVDC stanica između Austrije i CDU VERE-a se koristila za znatne količine razmijenjene električne energije u okviru dugoročnog ugovora sa SSSR-om, što je olakšalo odluku o investiciji u tu tehnologiju. Iako se u međunarodnim radovima isto spominje za jugoslavenski sustav sinkroniziran

---

Hrvatski državni arhiv (HDA) me elektroničkim pismom od 16. siječnja 2023. obavijestio da se arhiv *Republičkog sekretarijata za industriju, trgovinu i zanatstvo 1971-1974.*, *Republičkog sekretarijata za energetiku, industriju i zanatstvo 1974-1979.* i *Republičkog komiteta za energetiku, industriju, rudarstvo i zanatstvo 1979-1990.* nalazi kod Ministarstva gospodarstva, poduzetništva i obrta Republike Hrvatske. Građa Fonda za kreditiranje izgradnje elektroenergetskih objekata i postrojenja 1973-1982., Samoupravne interesne zajednice potrošača električne energije Hrvatske 1974-1990. i *Zajednice elektroprivrednih poduzeća Hrvatske 1974-1990.*, ne nalazi se u Hrvatskom državnom arhivu. U Hrvatskom državnom arhivu nalaze se sljedeći fondovi: R-HDA-1691. Samoupravna interesna zajednica za ekonomske odnose s inozemstvom 1977-1986; HR-HDA-2058. Republički komitet za odnose s inozemstvom 1977-1990, serija 9. Unapređenje i proširenje ekonomskih odnosa s inozemstvom; HR-HDA-1692. Republički sekretarijat za financije SRH 1956-1990.; HJR-HDA-2108. Republički savjeti 1975-1990, serija 3. Savjet za privredni razvoj i ekonomsku politiku, serija 7. Savezni savjeti. Ovim putem im se za informacije zahvaljujem.

<sup>122</sup> SSSR je davao pomoć Jugoslaviji (pšenica, aluminij, nafta, strojevi, krediti) 1956., što je koristio kao političko oružje protiv Jugoslavije, uskraćujući tu pomoć u veljači 1957., nastavljajući je u kolovožu, da bi ju opet mogao uskratiti u svibnju 1958. [18, str. 35.].

na UCPTE u pogledu razmjena s istočnim CDU VERE-om, u kontekstu pojeftinjenja te tehnologije, razmjene Jugoslavije s CDU VERE-om preko HVDC tehnologije po svemu sudeći nisu postojale. Potvrda nema ni u dijelu mađarske sinteze na engleskome jeziku, u kojoj postoje informacije o HVDC razmjeni električne energije Mađarske s UCPTE-om preko Austrije (od 1992.). Potvrda nema ni u hrvatskoj ni slovenskoj ni bugarskoj pa ni u crnogorskoj sintezi o povijesti prijenosa električne energije. S druge strane, o inicijativi povezivanja Jugoslavije i Italije podmorskim kabelom nema spomena u pregledanim radovima na engleskom jeziku koju su se bavili (i) jugoslavenskom elektroprivredom.

Elegantan je tehnološki pristup u kojem se izmjenično/istosmjernom pretvorbom postiže da dva sustava koji ne rade u sinkronom pogonu razmjenjuju električnu energiju, bez potrebe da se jedan dio sustava izdvoji otočnim pogonom od svojega matičnog sustava, i potom sinkronizira na drugi sustav da bi s njim razmjenjivao električnu energiju. Unatoč pojeftinjenju HVDC tehnologije, što je doprinijelo njezinoj primjeni u Europi (npr. Francuska – Velika Britanija 1965., Danska – Norveška 1976., Finska – SSSR 1981., Austrija - Čehoslovačka 1983.<sup>123</sup>), po svemu sudeći ta tehnologija nije primijenjena između Jugoslavije i CDU VERE-a, a postojao je odjek o njezinoj primjeni između drugih država u časopisu *Energija*.

Socijalistički odnosi u vođenju jugoslavenske elektroprivrede, u smislu razmjena električne energije, dodatno su narušavali međusobno povjerenje između jugoslavenskih republika (nacija), koje je započelo s niskih grana uslijed posljedaka ranijih razdoblja. Sasvim je upitno može li višenacionalna država, kao što je recimo bila Jugoslavija - u kojoj nije bilo moguće uspostaviti demokraciju (za razliku od višenacionalne Švicarske u kojoj jest) uslijed centrifugalnih nacionalnih sila<sup>124</sup> - postići učinkovit elektroprivredni sustav, a budući da se ne postiže međusobno povjerenje potrebno za optimalnu izgradnju zajedničke elektroenergetske infrastrukture i za uspostavu učinkovitog državnog tržišnog sustava razmjena električne energije. Iako, bile su uspostavljene međurepubličke razmjene motivirane ekonomskim silnicima, kao i nužnošću za postizanjem sigurnosti opskrbe električnom energijom uvezivanjem potrošačkih i proizvođačkih točaka, pa se tako gradila državna elektroenergetska mreža, koja se gradila i između država sa suprotstavljenim državnim svjetonazorima (npr. s dviju strana *Željezne zavjese*).

---

<sup>123</sup> *Energija*, god. 38 (1989), 2, 135-143.

<sup>124</sup> »Isprobani su svi ekonomski i politički aranžmani da se ta država očuva: bila je kapitalistička i socijalistička, monarhijska i republikanska, unitaristička i federalistička, pluralistička i monistička, kraljeva desničarska i maršalova ljevičarska diktatura. Bila je na Zapadu i Istoku, neopredijeljena i nesvrstana. Ništa nije pomoglo.«, Mirjana Kasapović (2023.), »Zbogom postjugoslavenstvu!«, *Analiza Hrvatskog politološkog društva : časopis za politologiju*, Vol. 20 No. 1, 2023.

Pravni sustav (pravo investitora na privatno vlasništvo), makroekonomska održivost (devize za uvoz električne energije), cjenovni signali na strani potrošača (utjecaj na energetska učinkovitost) i geopolitički odnosi, su među čimbenicima koji su utjecali na izgradnju dalekovoda i elektrana te na dostupnost električne energije u Hrvatskoj, a samim time i na sigurnost opskrbe električne energije u njoj, gdje se promatranjem količine prisilno ograničene potrošnje (redukcije) u Hrvatskoj može zaključiti o sposobnosti jugoslavenskoga sustava da pouzdano osigurava električnu energiju potrošačima u Hrvatskoj. Zapadni slobodnotržišni sustavi (UCPTE, skandinavski), iako iz jugoslavenskog očista naoko komplicirani (Ščap, Pavlović) a zapravo decentralizirano upravljani (višeumni sustavi<sup>125</sup>, centralno neupravljivi), pouzdanije su opskrbljivali svoje potrošače električnom energijom. Navedeno je razdoblje u Jugoslaviji, Hrvatskoj kao njezinom dijelu, kao i na svjetskoj razini, bilo popraćeno velikim godišnjim relativnim porastima električne energije, koji su postavljali za graditelje i voditelje sustava velike izazove, što valja gledati u surječju s redukcijama u Jugoslaviji. Otpori prema elektroenergetskim povezivanjima unutar Jugoslavije, kao i Jugoslavije s drugim sustavima, a uz to i neuvažavanje bitnosti jalovih tokova energije, nije doprinosilo sigurnosti opskrbe električnom energijom u Jugoslaviji.

Iako se čini da totalitarni sustavi - a uslijed neobaziranja na privatno vlasništvo, ljudska prava i pravne procedure - uspješnije grade elektroenergetski sustav (npr. infrastrukturu), pokazuje se da su netotalitarni UCPTE sustavi, kao i skandinavski, bili uspješniji u odnosu na jugoslavenski sustav prema kriteriju sigurnosti opskrbe električnom energijom<sup>126</sup>.

Zanimljivo bi bilo istražiti dinamiku razmjene električne energije u smislu utjecaja pojedinih jugoslavenskih republika u promatranom razdoblju na Hrvatsku (npr. utjecaj izgradnje *HE Đerdap* kroz Bosnu putem koncepta *nesusjednih razmjena*), a također i onima iz drugih država (npr. iz SSSR preko mađarskog sustava, te iz bugarskog sustava s viškom električne energije i snažnim međudržavnim vezama preko drugih jugoslavenskih republika), ako takvi podaci već nisu postali žrtva povijesnog zatora.

---

<sup>125</sup> Pogledati o višeumnim sustavima u: Jamshid Gharajedaghi (2008). *Sustavno razmišljanje – Upravljanje kaosom i složenosti: platforma za kreiranje poslovne arhitekture*, drugo američko izdanje, Stanke d.o.o., Varaždin, razlikuje ih od bezrazumskih (mehanicističkih) i od jednodimenzionalnih (bioloških) sustava.

<sup>126</sup> U Kini je došlo do porasta gospodarske produktivnosti i smanjenja siromaštva, zahvaljujući antirežimskim postupcima seljaka koji su se temeljili na tržišnoj ekonomiji, što je kineski režim želio spriječiti, a također i slobodnotržišnim djelovanjem Hong Konga koji je imao poseban status. Pogledati: Stephen Kotkin (2022.), *Pescent Knowledge: Stephen Kotkin on Xi's China, Putin's Russia | GoodFellows | Hoover Institution*, <https://www.youtube.com/watch?v=mihDhlwg96w>, od 7:46, pristup 7. 3. 2023. Vezano za antirežimske postupke seljaka koji su doveli do društvenoga blagostanja, Kotkin se poziva na: Kate Xiao Zhou (1996.). *How The Farmers Changed China: Power Of The People*, Westview Press. Stephen Mark Kotkin (r. 1959.), američki povjesničar i akademik.

## 5. Literatura

- [1] Vincent Christiaan Lagendijk (2008.). *Electrifying Europe : the power of Europe in the construction of electricity networks*. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Industrial Engineering and Innovation Sciences]. Aksant. <https://doi.org/10.6100/IR638264>
- [2] Vincent Lagendijk (2004.). *Electrifying Europe. The power of Europe in the construction of electricity*. Networks, [http://www.channelingreality.com/Power/Electrifying\\_Europe\\_WD.6.Lagendijk.pdf](http://www.channelingreality.com/Power/Electrifying_Europe_WD.6.Lagendijk.pdf), pristup 12. 12. 2022.
- [3] Vincent Lagendijk, Erik Van der Vleuten (2013.), »Inventing Electrical Europe: Interdependencies, Borders, Vulnerabilities«, iz knjige *The Making of Europe's Critical Infrastructure*, [https://www.researchgate.net/publication/262684673\\_Inventing\\_Electrical\\_Europe\\_Interdependencies\\_Borders\\_Vulnerabilities](https://www.researchgate.net/publication/262684673_Inventing_Electrical_Europe_Interdependencies_Borders_Vulnerabilities), pristup 10. 5. 2023.
- [4] UCTE <sup>127</sup> (2009. ili ranije). *The 50 Year Success Story – Evolution of a European Interconnected Grid*, [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/110422\\_UCPTE-UCTE\\_The50yearSuccessStory.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/110422_UCPTE-UCTE_The50yearSuccessStory.pdf), pristup 22. 11. 2022.
- [5] Josip Moser (2003.). *Pregled razvoja elektroprivredne djelatnosti u Hrvatskoj 1875. – 2000.*, Zagreb, Kigen d.o.o.
- [6] Kigen d.o.o. (2008.). *50 godina organiziranog prijenosa električne energije u Hrvatskoj*.
- [7] HRO CIGRÉ (2022.). *Sedamdeset godina djelovanja CIGRÉ u Hrvatskoj*.
- [8] Markovčić Boris i dr. (1984.). *Razvoj elektrifikacije Hrvatske 1. dio od početka elektrifikacije do 1945.*
- [9] Markovčić Boris i dr. (1987.). *Razvoj elektrifikacije Hrvatske 2. dio od 1945. do 1983.*
- [10] Elektroistra (1990.). *Elektroistra u povodu obljetnica elektrifikacije 1900 – '45, '50 – 1990 90 godina elektrifikacije Istre 40 godina Elektroistre Pula*, Pula.
- [11] Daniel Feocze (1962.), »UCPTE Udruženje za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije zapadne Evrope«, *Energija*, br. 5-6, str. 125.-141.
- [12] Slavko Vujević (2022.), »POČECI RAZVOJA ELEKTRIFIKACIJE U EUROPI I SJEVERNOJ AMERICI«, znanstveni skup povodom 100. obljetnice elektrifikacije Splita

---

<sup>127</sup> UCPTE je kasnije preimenovan u UCTE.

- [13] MAVIR<sup>128</sup> (2009.). *The First 60 Years: A History of Transmission System Operation in Hungary*, Budimpešta, sažetak na engleskome jeziku dostupan je ovdje, <https://www.mavir.hu/documents/10262/160379/History+of+Transmission+System+Operation+in+Hungary.pdf/3b744975-89e6-4b16-9d83-1ecc55064392>, pristup 19. 01. 2022.
- [14] ELES – Elektroslovenija (2004.). *Trideset let sinhronoga obratovanja z Evropo Thirty Years of Synchronous Operation with Europe*, <https://www.yumpu.com/en/document/read/10450385/eles-si-elektro-slovenija-doo>, pristup 1. 12. 2022.
- [15] Elektroprivreda Crne Gore AD Nikšić (2010.). *100 godina crnogorske elektroprivrede, Nikšić*, <https://pdfslide.net/documents/100-godina-crnogorske-elektroprivrede.html?page=151>, pristup 3. 11. 2022.
- [16] Mire Spirov (1999.). *History of Electrification in Bulgaria*, Electroimpex plc, <https://archive.org/details/HistoryOfElectrificationInBulgaria/page/n3/mode/2up>, pristup 28. 1. 2023.
- [17] Miroslav Jovanović (2004.), »RADIVOJE MARKOVIĆ«, <http://www.zapisioelektroprivredi.rs/velikanielektroprivrede>, pristup 13. 12. 2022., rad je napisan na temelju diktafonski zabilježenoga razgovora između Jovanovića i Markovića u tri navrata 2004. godine.
- [18] Vincent Lagendijk, Frank Schipper (2016.), »East, West Home's Best: The Material Links of Cold War Yugoslavia, 1948-1980«, *Icon*, 2016, Vol. 22 (2016), pp. 28-54
- [19] SFRJ Savezni zavod za statistiku (1989.). *JUGOSLAVIJA 1918. – 1988 STATISTIČKI GODIŠNJAK*, Beograd, <http://publikacije.stat.gov.rs/G1989/Pdf/G19892004.pdf>, pristup 25. 5. 2021.
- [20] Tomislav Pavlović (1962.). *IZVJEŠTAJ po temi "REGULACIJA FREKVENCIJE I SNAGE U POVEZANIM SISTEMIMA"*, Zagreb, uvid u neobjavljeno digitalizirano izvješće, zahvaljujem kolegi koji mi je ustupio ovaj Izvještaj.
- [21] urednici Erik van der Vleuten; Arne Kaijser; Anique Hommels; Per Högselius (2013.). *The Making of Europe's Critical Infrastructure: Common Connections and Shared Vulnerabilities*, izdavač PALGRAVE MACMILLAN.
- [22] <https://hro-cigre.hr/miljokaz>
- [23] <http://journalofenergy.com/index.php/joe/issue/archive>
- [24] <https://arhiva.vecernji.hr/>
- [25] <https://arhiv.slobodnadalmacija.hr/>

---

<sup>128</sup> Mađarski operator prijenosnog sustava.



## **Inter-state, inter-republic and inter-area electricity exchanges until 1990 in the Croatian context**

**Summary:** The paper presents a comprehensive overview of historical records concerning electricity exchanges in Croatia within the broader context of Europe. It focuses on various aspects, including the potential for exchanges (both consumption and production points geographically), the necessary infrastructure for electricity transmission (transmission lines), actual exchanges (inter-republic and inter-state), and methods used to compensate for the value of exchanges (such as energy-for-energy, energy-for-money, and investments in power plants for energy). Despite researching published works on the Croatian electric power industry, no synthesis was found that adequately addressed inter-republic or inter-state agreements on electricity exchanges concerning the Croatian electricity system until 1990, specifically in terms of compensation for the value of exchanges. Based on historical evidence, a narrative is presented that aligns with the available sources. The findings indicate that broader and regular inter-republic and inter-state exchanges in Croatia were possible starting from the mid-1970s of the 20th century. As a result, the presentation of exchange sources focuses primarily on that period, while earlier exchanges are briefly touched upon. The paper also examines the dynamics of constructing energy infrastructure, not only within Croatia or its connections to other systems but also from a broader perspective that encompasses the necessary infrastructure for exchanges. The paper highlights the connection of Dalmatia with the rest of Croatia, illustrating that establishing an electricity exchange between distant areas entailed considerations beyond technical and economic factors. The study reveals that comprehending the Croatian system requires an examination of not only the Yugoslav context but also the wider European and global contexts. Additionally, the paper introduces the term "non-neighbouring exchange" to illustrate the impact of external power systems on the concerning system's power balance, extending beyond the borders of neighboring systems (e.g., Italy – concerning system in tight situation, France – non-neighbouring system which increased production for Italy, which was imported by Switzerland as Italian neighbouring system, for Switzerland to be able to deliver electricity on the Italian border in 1921).

**Keywords:** electricity, electro energetic system, history of electrification, electricity market

## Prilog

Marko Lovrić (r. 1949.) je radio kao dispečer u Zagrebu od 1974. do 1977., nakon čega prelazi u splitski dispečerski centar. Ispričao mi je da su međurepubličke razmjene u Jugoslaviji išle većinom po principu vraćanja energije (energija za energiju). Primjerice, u slučaju kada se u drugu republiku izvozi 2,5 MWh električne energije noću, u drugom se razdoblju u dnevnim satima dobiva nazad 1 MWh iz te druge republike. Omjeri za zamjenu energije išli su prema omjerima koji su ovisili o tome kada se preuzima ili isporučuje električna energija u drugu republiku. Najviši omjer je bio 1:2,5 – koji primjerice određuje da subjekt za jedan preuzet MWh u razdoblju kada električna energija više vrijedi (razdoblje više tarife), u kasnijem razdoblju kada energija manje vrijedi (razdoblje niže tarife), taj isti subjekt za taj jedan MWh vraća dva i pol MWh-a. Ostali omjeri su bili 1:1; 1:1,5; 1:2 itd., koji su se određivali međurepubličkim dogovaranjem. Osim zamjene energije, električna energija se između republika razmjenjivala i na temelju načela energija za novac. 1974. postojalo je tržište električne energije na kojem su elektroprivrede na području Jugoslavije međusobno trgovale, uglavnom na bilateralnom tržištu gdje je bila definirana i satna količina energije i cijena i vrijeme isporuke, s tehničkim, ekonomskim i pravnim uvjetima. Cijene međurepubličkih razmjena određivale su se između republika bilateralnim pregovorima, koji su se okončavali kratkoročnim sporazumima. Za uravnoteženje pojedinog regulacijskog područja postojao je zajednički sustav sekundarne regulacije s sjedištem u JUGEL-u koji je bilo u Beogradu, gdje se utvrđivala zajednička greška i greška/odstupanje pojedinog regulacijskog područja (republike) te bi slali signale u republičke dispečerske centre za ispravljanje grešaka, a odatle prema elektranama, uglavnom hidroelektranama. U Hrvatskoj to su bile *HE Zakućac*, *HE Senj* i *HE Vinodol*. Ako sekundarna regulacija nije mogla otkloniti grešku/odstupanje, onda su dispečerske službe koristile tercijarnu regulaciju, direktnim nalogima elektranama ili velikim potrošačima za povećanje ili smanjenje snage u sustavu. Ukoliko ni to nije bilo dovoljno, postojala je mogućnost da se međurepubličkim dispečerskim dogovorom vrši razmjena energije na naturalnom principu (energija za energiju) u određenim omjerima davanja i primanja koji su se kretali do 1:2,5, što je ovisilo o vremenu davanja i primanja. Postojali su *Pravilnik o radu elektroenergetskoga sistema i dispečerske službe*, kao i *Samoupravni sporazum o radu dispečerske službe Jugoslavije*, koji su uređivali rad dispečerske službe. Dokumentacija iz toga razdoblja koja se odnosi na međurepubličke razmjena nalazi se u dispečerskoj službi u Splitu, Vrboran.

Miće Klepo<sup>129</sup> bio je dispečer u Hrvatskoj od 1985. Opisao mi je svoja sjećanja koja se tiču međurepubličkih i međudržavnih razmjena. Sve do nekog doba razmjena električne energije s drugim državama i s drugim republikama išla je preko središnje organizacije Jugoslavije za elektroprivredu (JUGEL). Način nabave se mijenjao, tako su 1985. republike mogle samostalno kupovati, prodavati i zamjenjivati energiju sa susjednim elektroprivredama, republičkim ili onima iz drugih država, a dio je tehničke koordinacije ipak i dalje ostao na JUGEL-u. Primjerice ako je u Dalmaciji bilo viška proizvodnje električne energije ona se u Italiju mogla izvesti, Italija bi ju onda kasnije vratila po nekome omjeru (npr. za 1 MWh iz Hrvatske kasnije se iz Italije vraća 0,5 MWh). Višak proizvodnje dakako nastojao se razmijeniti s drugim republikama (npr. bila je razmjena po principu energija za energiju 1 MWh za 1 MWh). Energija se i kupovala bilo od republika bilo od drugih država (princip energija za novac). Često bi se kupnja ili prodaja dogovarale i potvrđivale »*depešama*« tijekom noći, a onda bi uslijedilo formalno rješenje, konačno i plaćanje troškova za energiju. Osim međurepubličkih i međudržavnih obveza s radnom energijom, bile su međurepubličke i međudržavne obveze koje se tiču jalove energije. Tako je u jednom slučaju Austrija isključila elektroenergetski sustav Jugoslavije zbog dugotrajnog preuzimanja prekomjernog iznosa jalove energije.

Ivica Toljan<sup>130</sup> je bio od 1986. dispečer u Hrvatskoj. Iznio mi je svoje sjećanje na rad dispečerske službe tijekom Jugoslavije. Po njem bi dan dispečerske službe trebao biti 6. travnja, jer je toga datuma 1954. uspostavljen republički dispečerski centar Hrvatske. Za vrijeme njegovoga rada švicarski EGL u Laufenburgu bio je veliki poslovni partner Jugoslavije u smislu razmjena električne energije s drugim državama. Hrvatska mogla je izravno pregovarati o cijenama i količinama za svoje potrebe, a o rezultatima pregovora se »*depeša*« slala JUGEL-u. Osim rukovođenja ugovorenim razmjenama, preko JUGEL-a je išlo i plaćanje za energiju kada se ona plaćala. Moglo se ići i na zamjenu energije s drugim državama (energija za energiju). Postojao je inženjer za planiranje za sutrašnji dan (*day ahead dispečer*). Po iskustvenoj je metodi *day ahead dispečer* određivao krivulju potrošnje koju je onda popunjavao uvažavajući raspoložive mu domaće izvore (*Nuklearna elektrana Krško*, hidroelektrane i termoelektrane). Nedostajuću mu energiju trebalo je nabaviti ili u republikama ili u drugoj državi, a slično se odnosi i na slučaj izvoza ako li je bilo viška energije. Svoj je plan *day ahead dispečer* slao do 13 sati u dispečerski centar Hrvatske. Konačni plan su dispečeri slali u centar

---

<sup>129</sup> Miće Klepo (r. 1958.), doktor znanosti iz elektrotehnike, radio je u tvrtki Rade Končar, 1985. u *Republičkom dispečerskom centru Hrvatske* u Zagrebu, *Institutu elektroprivrede* u Zagrebu, *Energetskom institutu Hrvoje Požar* i bio je predsjednik *Vijeća za regulaciju energetske djelatnosti* a onda je zaposlen na mjestu Glavnog savjetnika *Hrvatske energetske regulatorne agencije*

<sup>130</sup> Ivica Toljan (r. 1959.), doktor znanosti iz elektrotehnike, bio je član uprave HEP-a d.d., radio je u hrvatskom operatoru tržišta energije HROTE-u te je potom član uprave u hrvatskoj burzi električne energije CROPEX.

JUGEL-a u Beogradu. JUGEL je dobivao planove i iz drugih republika te ih je objedinjavao. JUGEL je sagledavao cijeli sustav, pa je imao uvid u planirano netostanje cjelokupnoga jugoslavenskoga sustava, koje je slao u Laufenburg. Pristup Hrvoja Požara (*»metoda konstantne i varijabilne energije«*) bio je više teoretski jer je *day ahead dispečer*, kod slaganja elektrana, radio više iskustveno. U slučaju viška hidroenergije, umjesto prelijevanja vode, *day ahead dispečer* mogao je prijaviti višu potrošnja u odnosu na realnu (preplaniravanje). U slučaju suše kada je bilo nedovoljno energije, mogla se prijaviti niža potrošnja u odnosu na očekivanu (podplaniravanje). Razlike koje nakon ostvarene razmjene nastaju kod preplaniravanja (npr. Jugoslavija izvozi 800 MWh u satu više od planirane razmjene poslane u Laufenburg) i podplaniravanja (npr. druga Jugoslavija uvozi 400 MWh više u od planirane razmjene poslane u Laufenburg) bile su uočljive u UCPT-u. Razlika između ekonomske netorazmjene i fizičke netorazmjene (*»nenamjerna odstupanja«, unintentional deviations*), nadoknađivala se po načelu energija za energiju. Umjesto da je voda prelivena, ona je tada iskorištena za isporuku u druge sustave – nakon čega je u drugome razdoblju ona vraćena u Jugoslaviju (energija za energiju). U slučajevima s većim *»nenamjernim odstupanjima«* (potplaniravanje, preplaniravanje), pogotovo ako je došlo do poremećaja u frekvenciji, JUGEL je dobivao oštre kritike. Za ostvarena odstupanja u odnosu na satni plan razmjene, koncem tjedna se određivao plan satne kompenzacije energije za slijedeći tjedan po tarifnim grupama.

## KVANTNA FIZIKA I MODERNE TEHNOLOGIJE

PIF - Zagreb - lipanj 2023.

# 10000 Zagreb

#e-mail: bhanzek1@gmail.com

Branko Hanžek<sup>#</sup> i Dubravko Horvat<sup>b</sup>

<sup>b</sup> Zavod za fiziku, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Unska 3, 10000 Zagreb

<sup>b</sup>e-mail: dubravko.horvat@fer.hr

Zagreb, lipanj 2023.

### Sažetak

Od samog početka XX stoljeća pa sve do prve četvrtine XXI stoljeća kvantna fizika je trajna i dominantna tema fizikalnih istraživanja mikrosvijeta kroz niz teorijskih radova, preko fundamentalnih eksperimenata do pretakanja u tehnologije koje posebno u XXI stoljeću preuzimaju pridjev *kvantni* i tako pokazuju duboku povezanost fundamentalnih fizikalnih istraživanja s tehnološkom i tehničkom realizacijom naizgled apstraktnih fizikalnih otkrića. Ovdje ćemo prikazati neke od bitnih teorijskih i eksperimentalnih koraka u stvaranju kvantnog okruženja te opisati današnji trenutak statusa "kvantnog" u tehnološkim projektima i dati pregled nekih futurističkih razmišljanja o znanstvenim i tehnološkim promišljanjima budućnosti.

### Sadržaj

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Uvod - pet velikih teorija fizike .....                              | 1  |
| Pet velikih teorija fizike (5GTF) .....                                 | 1  |
| 2. Termodinamički izvor Planckovog zakona .....                         | 2  |
| 3. Razvoj kvantnih ideja nakon Plancka .....                            | 7  |
| 4. Kvantna mehanika od Schrödingera do danas .....                      | 11 |
| 5. Kvantne tehnologije .....                                            | 21 |
| Kvantno računarstvo .....                                               | 22 |
| Kvantna kriptografija .....                                             | 23 |
| Kvantna simulacija .....                                                | 24 |
| Kvantne informacije .....                                               | 25 |
| Kvantna metrologija .....                                               | 25 |
| 6. Epilog .....                                                         | 28 |
| Zahvala .....                                                           | 29 |
| DODATCI                                                                 |    |
| DODATAK D1 Planckov zakon zračenja crnog tijela i zakoni zračenja ..... | 30 |
| DODATAK D2 Planckov zakon zračenja crnog tijela iz termodinamike .....  | 33 |
| 7. Literatura i reference .....                                         | 36 |



## 1. Uvod - pet velikih teorija fizike

### 1. Uvod

Kvantna fizika je u ovoj prvoj četvrtini 21. stoljeća već više od 100 godina stara no ta, za čovjeka (uglavnom) nedostižna starost nije proizvela miran život tog dijela fizike već je nastavljena borba za i oko kvantne fizike, posebno sa stanovišta njenog razumijevanja i njene interpretacije. Zato ovdje počinjemo s jednim citatom jednog od najvećih teoretskih fizičara XX stoljeća S. Weinberga, “tvorca” Standardnog modela elementarnih čestica, Nobelovog laureata (1971. godine) i autora stotine znanstvenih članaka te niza knjiga i eseja ali i stručnih knjiga iz kvantne mehanika, kvantne teorije polja i kozmologije:

Kvantnu mehaniku smatramo danas univerzalnim matematičkim okvirom za zakone prirode. Fizičari se svi slažu s načinima primjene kvantne mehanike u računima, a oni su doista pružili zapanjujuće rezultate proračuna svojstava atoma, molekula, atomske jezgre, elementarnih čestica i još mnogo drugog. Međutim, nastavljaju se kontroverze vezane uz neka svojstva, prije svega formulacije i opravdanja njenih postulata vezanih uz mjerenja i vjerojatnost. [W2018]

Treba se također sjetiti da je Nobelova nagrada za fiziku godine 2022. dodijeljena trojici fizičara (Alain Aspect, John F. Clauser i Anton Zeilinger) koji se bave upravo fundamentalnim problemima naznačenim u citatu S. Weinberga, što također pokazuje da postoji još golem prostor istraživanja u svim aspektima kvantnih pojava. Njihova istraživanja su također bitno vezana i uz našu temu veze kvantne fizike i moderne tehnologije, o čemu govorimo i zadnjim odjeljcima ovog teksta. Stoga navodimo originalni tekst razloga dodjeljivanja Nobelove nagrade:

*“... for experiments with entangled photons, establishing violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science.”*

Ovdje ćemo pokazati kako je tekao razvoj kvantne mehanike i posebno istaknuti vezu tog procesa i jednog segmenta fizike koji je blisko vezan uz tehnologiju i njen razvoj, što je vrlo često zaobiđeno u “standarnim” uvodnim tekstovima. Komentirat ćemo osnovne postulate kvantne mehanike, opisati probleme vezane uz interpretaciju te nastaviti opisivati današnji trenutak koji je zanimljiv jer se odjednom kvantna mehanika našla u području interesa tehnologije, ne samo deklarativno već se ona doista pojavljuje kao jedina moguća formulacija nekih tehnoloških tema koje bez kvantne mehanike jednostavno ne mogu postojati.

### Pet velikih teorija fizike

Često je nezahvalno raditi preglede, popise, liste i podjele pojedinih aktivnosti, ljudi i događaja, jer će se uvijek moći postaviti pitanje opravdanje ovakve ili onakve podjele ili pristupa, ali ovdje ćemo dati jednu (grubu) podjelu fizike često zvanu *Pet velikih teorija fizike* (što nas posebno zadnje vrijeme može sjetiti rasprave o **5G** mreži, pa si možemo ovdje dozvoliti i parafrazirati našu podjelu kraticom **5GTF**). Imamo dakle sljedeće:

- (1) Klasična mehanika (Newton, Leibnitz, Jacobi, Euler, Lagrange, Hamilton);
- (2) Termodinamika i statistička fizika (Carnot, Clausius, Kelvin, Boltzmann, Wien, Gibbs, Helmholtz, Maxwell, Planck);
- (3) Klasična elektrodinamika (Faraday, Ampere, Tesla, Maxwell, Weber, Heaviside, Lorentz);
- (4) Specijalna i opća teorija relativnosti (Poincarè, Mach, Einstein, Lorentz, Hilbert);
- (5) Kvantna mehanika i kvantna teorija polja (Planck, Bohr, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Pauli, Ehrenfest, Jordan).

U toj listi nalazimo tek neka imena koja nas samo podsjećaju na jednakosti, jedinice, zakone i principe koji su po njima dobili ime.

Kvantna mehanika, koja je stavljena na kraj gornje 5GTF liste izrasla je iz nadahnutih koraka nekolicine hrabrih i “drskih” fizičara koji se nisu ustručavali načiniti neke korake koji su bili u suprotnosti s duhom ili principima fizike onog vremena, a to je kraj XIX stoljeća i početak XX. To je razdoblje postindustrijske revolucije, koja je krenula izumom parnog stroja.

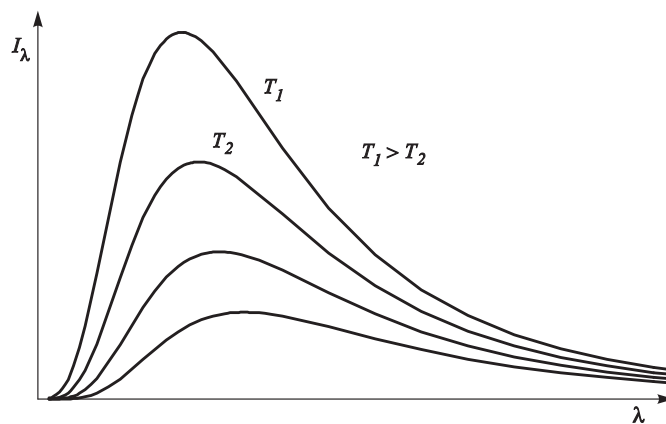
Parni stroj je toplinski stroj koji pomoću topline (koji predaje toplinu vodi i pretvara je u vodenu paru) proizvodi rad. Toplinski stroj slijedi zakone jedne od 5GTF - termodinamike. U knjizi istog autora S. Weinberga [W2015] nalazimo cijelo poglavlje posvećeno tehnologiji helenističkog razdoblja u kojem spominje Herona iz Aleksandrije koji je, uz istraživanje optike i mehanike, konstruirao i mehanički toplinski stroj koji je poznat pod imenom Heronova kugla. Uporabljivi parni stroj konstruirao je D. Papin (potkraj XVII stoljeća), a zatim slijedi niz konstrukcija strojeva koji su našli svoj vrhunac u stroju koji je konstruirao J. Watt u 2. polovici XVIII stoljeća. Strojevi njegovih prethodnika ipak su našli svoje primjene u rudarskim oknima, a vrhunac industrijske revolucije omogućen je uporabom parnog stroja za pogon lokomotive (R. Fulton) i parnog broda (G. Stephenson). Potpuno razumijevanje (najboljeg) načina rada parnih strojeva ugrađeno je u jednu od 5GTF - termodinamiku, dio (teoretske) fizike za koju ćemo vezati sam početak kvantne fizike. Istraživanja odnosa topline, rada i svojstava sredstva koje obavlja rad u toplinskom stroju doveli su do uvođenja pojmova unutarnje energije, entropije, slobodne energije (Helmholtz, Gibbs), entalpije itd., a svi ti tzv. termodinamički potencijali vezani su Maxwellovim relacijama.

## 2. Termodinamički izvor Planckovog zakona

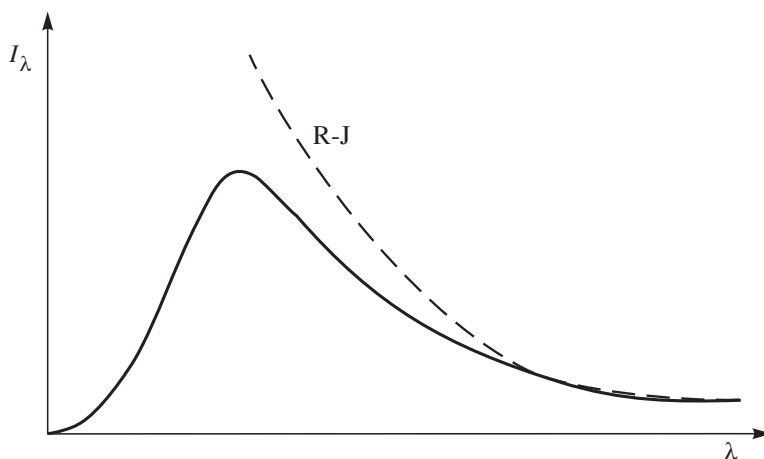
Blizak razvoj teorije toplinskih pojava kao jedne od velikih teorija fizike i tehnologije etablirao je niz teoretskih fizičara koji su u bliskoj suradnji s eksperimentalnim fizičarima rješavali fundamentalne probleme koji su, nadalje, poticali razvoj industrijskog društva. Iako je bilo naznaka, čak i kod poznatih imena teoretske fizika da je “fizika kraja XIX stoljeća obavila svoj posao” (tj. “da je objasnila kako funkcionira fizikalni svijet”) ono što se “valjalo iza brda”, a što su neoprezni fizičari zvali “mali oblaci na nebu fizike” pokazalo je da se otvara sasvim novi svijet koji je doveo da novih fundamentalni spoznaja ali i do filozofijske promjene gledanja na fizikalni svijet i na fizikalne procese, posebno u domeni mikroskopskih pojava.

Jedan od “oblačaka na nebu fizike” je bio problem zračenja apsolutno crnog tijela. Prema mjerenjima spektralne gustoće zračenja, tj. intenziteta zračenja mjerenog duž promjene valnih duljina (ili frekvencija), teorija je trebala, uz pomoć termodinamike, statističke fizika i elektrodinamike, uz jednostavne mehaničke procese (poput harmoničkog oscilatora i sl.) iznjedriti zakon *zračenja crnog tijela* - matematički zapis tog zakona - koji bi morao biti u skladu s mjerenjima. To razdoblje (XVIII i XIX stoljeća) bilo je prepuno rezultata mjerenja spektara (Frauhofer, Young, Fresnel, itd.) koji su pokazivali da valja konzekventno primijeniti (klasične) zakone fizike, koji su u drugim područjima davali sjajne rezultate i da će ti problemi biti riješeni te da fizici ostaje zadatak da popravlja decimale u prirodnim konstantama jer je njen posao inače završen. Međutim, taj naoko jednostavan zadatak za vrsne fizičare onog doba pokazao se nerješiv. Primjer koji je posebno zanimljiv za nas jest Rayleigh-Jeansov zakon koji vodi na rezultat koji je toliko nesumjerljiv s eksperimentalnim rezultatima mjerenja spektra zračenja crnog tijela da je tu situaciju Rudolf Clausius, jedan od “termodinamičara” velikog ugleda, prozvao *ultravioletna katastrofa*. Radilo se, dakle o konzekventnoj primjeni zakona termodinamike, mehanike i elektrodinamike koji su imali zadatak da pronađu formulu koja će uz zadani parametar temperature proizvesti krivulju koja slijedi eksperimentalne točke dobivene mjerenjem intenziteta zračenja koje izlazi iz izotermne šupljine u toplinskoj ravnoteži. Tim su se mjerenjima posebno intenzivno bavili fizičari poput H. Rubensa, F. Kurlbauma, O. Lummera i E. Pringsheima i oni su postepeno sve više širili područje mjerenja te su vrlo precizno mogli nacrtati eksperimentalnu krivulju za velik raspon valnih duljina





Slika 2.1 - Spektralna gustoća zračenja apsolutno crnog tijela za različite temperature



Slika 2.2 - Spektralna gustoća zračenja i Rayleigh-Jeansov zakon

$\lambda$  (ili frekvencija  $\nu$ ). Rezultati njihovih mjerenja i teoretski rezultati vrsnih fizičara koji su “proizveli” Rayleigh-Jeansov zakon prikazani su na slikama. Spektralna gustoća zračenja dana je ovako

$$I_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda} = f(\lambda, T). \quad (2-1)$$

Od niza imena koja su navedena za drugu veliku teoriju fizike iz 5GTF, za termodinamiku, ovdje je nužno na velika vrata uvesti Maxa Plancka, koji je najveći dio svog znanstvenog rada posvetio termodinamici i to posebno zakonima termodinamike u kojima bitnu ulogu igra entropija.

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858.-1947.) bio je njemački fizičar poznat po radovima iz termodinamike i kvantne teorije. Autor je niza knjiga od kojih je posebno važna “Treatise on Thermodynamics” koja je doživjela niz izdanja, a u kojoj je uveo nove formulacije zakona termodinamike te istaknuo važnost entropije. Njegov rad na tretiranju zakona zračenja apsolutno crnog tijela predstavlja početak kvantne teorije iako je u ranijem razdoblju istraživanja odricao postojanje atoma te je poznat njegov sukob s Boltzmannom koji je u termodinamiku uveo kinetičku teoriju te je tako započeo istraživanja u statističkoj fizici.

Poznati su i zakoni termodinamike “po Plancku” pa je bilo za očekivati da će i on pristupiti problemu koji je čvrsto stajao neriješen. Planck je krenuo od prvog zakona termodinamike (u diferencijalnom obliku)

$$dU = d'Q - d'W + \mu dN \quad (2-2)$$

gdje je  $U$  unutarnja energija,  $Q$  (dovedena ili odvedena) toplina,  $W$  rad najčešće napisan kao  $d'W = p dV$ ,  $\mu$  kemijski potencijal (povezan s Fermijevom energijom za fermionske sustave) i  $N$  broj čestica. Crtice na diferencijalima podsjećaju da se radi o promjenama koje ovisne o načinu kako se došlo od početnog do konačnog stanja (odnosno, radi se o ovisnosti o vrsti toplinskog procesa ili prijelaza). Za stalan broj čestica  $N$  je  $dN = 0$  pa vidimo da je razlika o procesu ovisnih promjena jednaka funkciji stanja  $U$  čija promjena ne ovisi o procesu. Da bi se doskočilo neugodnoj situaciji “sa crticama na diferencijalu” uvela se termodinamička funkcija entropija koja je jednaka

$$dS = \frac{1}{T} d'Q \quad (2-3)$$

pa se prvi zakon termodinamike sada može napisati ovako

$$T dS = dU + p dV \quad (2-4)$$

i za procese s fiksnim volumenom dobijemo da je  $dS = dU/T$ . Općenito možemo napisati

$$dS(U, V) = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_V dU + p \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_U dV \quad (2-5)$$

pa imamo važnu relaciju

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}. \quad (2-6)$$

Vrlo važan korak načinjen je nakon niza eksperimentalnih rezultata koji su pokazali da je UV katastrofa uzrokovana prevelikom intenzitetom na malim valnim duljinama, a tu je eksperimentalnu činjenicu pokušao popraviti Wien koji je jednostavno konstruirao matematički izraz, danas poznat i pod imenom *Wienova raspodjela* koji opisuje unutarnju energiju (njenu srednju vrijednost proporcionalnu frekvenciji) ovako

$$U = K\nu e^{-L\nu/T} \quad \text{ili} \quad U = \frac{M}{\lambda^5} e^{-N/\lambda T}, \quad (2-7)$$

odnosno koji daje spektralnu gustoću zračenja u sljedećem zapisu

$$f(\lambda, T) = \frac{c}{4} \frac{C}{\lambda^5} e^{-D/\lambda T}. \quad (2-8)$$

Ta formula popravila je ponašanje za područje gdje je Rayleigh-Jeansov zakon zakazao, ali gornji izraz nije imao iza sebe teoretsku podlogu, već je izrastao iz matematičke manipulacije, uz potrebu prilagođavanja konstanti ( $K, L, M, N, C, D$ ) eksperimentalnim podatcima. Osim toga, nakon formulacije Wienove raspodjele novi eksperimenti (Lummer, Pringsheim) su pokazali da u području gdje je dobro slaganje Rayleigh-Jeansovog zakona s eksperimentom, Wienova raspodjela daje veliko (40%- 50%) neslaganje s eksperimentima. No Planck je uvidio da se pomoću prvog zakona termodinamike, za zatvoreni sustav stalnog volumena, koji prema tome ne može obavljati rad širenjem ili kompresijom, može izvesti Wienov zakon iz entropije dane ranije u jednakosti (2-6) i uz “promjenu-promjene” entropije dane ovako

$$\frac{d}{dU} \left( \frac{dS}{dU} \right) = \frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U}. \quad (2-9)$$

Jednostavan račun koji je proveo Planck (vidjeti dodatak D2) daje Wienovu raspodjelu

$$U = \frac{1}{\gamma} e^{-1/\alpha T} \quad \text{ili} \quad U = a\nu e^{-b\nu/T} \quad (2-10)$$

i za entropiju (prema zadnjem zapisu unutarnje energije)

$$S = -\frac{U}{b\nu} \left[ \ln \left( \frac{U}{a\nu} - 1 \right) \right]. \quad (2-11)$$

Znajući da u jednom području Wienova raspodjela ne slijedi eksperimentalne rezultate, Planck je pokušao nadopuniti gornju ovisnost entropije i razmotrio je ovisnost entropije o (unutarnjoj) energiji u kvadratičnom obliku

$$\frac{d^2 S}{dU^2} \sim \frac{1}{U^2}. \quad (2-12)$$

Taj izraz vodi na formulu koja se slaže s eksperimentom u jednom području, koje, opet, ne daje dobro ponašanje u području gdje vrijedi inverzna linearna ovisnost o energiji. Odgovor se nameće: valja uzeti obadviije mogućnosti! To je upravo i napravio M. Planck: on je složio “interpolacionu formulu” koja uključuje linearnu ovisnost (2-9) i (inverznu) kvadratičnu ovisnost (2-12), tj.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dU} \left( \frac{dS}{dU} \right) &= \frac{-A}{U(B+U)}, \quad \text{ili} \\ d \left( \frac{1}{T} \right) &= -\frac{A}{U(B+U)} dU \end{aligned} \quad (2-13)$$

što vodi (prema dodatku D2) na izraz

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= -\frac{A}{B} \ln \frac{U}{B+U} \quad \text{ili} \\ U &= \frac{B}{e^{B/AT} - 1}, \end{aligned} \quad (2-14)$$

odakle je

$$\begin{aligned} f(\lambda, T) &= \left[ \frac{c}{4} \right] \frac{8\pi}{\lambda^4} U \quad \text{i} \\ f(\nu, T) &= \frac{2\pi\nu^2}{c^2} U \\ &= \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{B}{e^{B/AT} - 1}. \end{aligned} \quad (2-15)$$

Valja se sjetiti da su spektralne gustoće zračenja za valnu duljinu i frekvenciju povezane ovako

$$\begin{aligned} f(\lambda, T) d\lambda &= f(\nu, T) d\nu \quad \text{uz intenzitet } I \\ I &= \int_0^\infty \frac{dI}{d\lambda} d\lambda = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda \quad \text{ili} \\ f(\lambda, T) &= \frac{dI}{d\lambda}, \end{aligned} \quad (2-16)$$

a gustoća energije  $\rho(\nu, T)$  povezana je s spektralnom gustoćom zračenja ovako

$$f(\nu, T) = \frac{c}{4} \cdot \rho(\nu, T) \quad (2-17)$$

pa je intenzitet jednak

$$I = \int_0^\infty f(\nu, T) d\nu. \quad (2-18)$$

Formula (2-15) je uz namještanje konstanti  $A$  i  $B$  vodila je na savršeno slaganje s eksperimentalnim rezultatima duž cijelog područja frekvencija. Međutim, ta formula je izvedena metodom često zvanom

“eksperimentalnom teoretskom fizikom”, što je u stvari oksimoron, jer pridjevi “eksperimentalni” i “teoretski” nemogu biti zajedno u takvoj sintagmi. Radi se, dakako, o “isprobavanju - eksperimentiranju” s formulom koja vrijedi ili ne vrijedi u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima, tj. ona nije izvedena iz (prvih) principa teoretske fizike. To je bilo savršeno jasno i Plancku i on je stoga želio na neki drugi način doći do takve formule, na način koji izvire iz termodinamičke teorije. M. Planck je kao vrsni i uvjereni termodinamičar krenuo od “svoje” entropije, slijedeći relaciju koju je posredno izveo L. Boltzmann, a koja povezuje entropiju  $S$  s vjerojatnošću

$$S = k \ln W. \quad (2-19)$$

Pri tome je pretpostavio da se u izotermnoj šupljini iz koje izlazi zračenje (apsolutno crnog tijela) nalaze harmonički oscilatori - Hertzovi dipoli ili rezonatori, kako ih on naziva, koji titraju u termodinamičkoj ravnoteži odgovarajućim energijama. Radi se o prisilnom titranju rezonatora s malim prigušenjem u poznatom obliku iz mehanike titranja

$$m\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi = eE(t). \quad (2-20)$$

Prigušenje odgovara izračenoj energiji koja čini sprektar zračenja apsolutno crnog tijela. Energije zračenja  $P$  raspodjeljuju se na  $M$  rezonatora u (prema L. Boltzmannu) “kompleksione”. Radi se o raspodjeli  $P$  elemenata u  $N$  kutija, pri čemu se ni elementi ni kutije međusobno ne razlikuju. Poznati rezultat iz kombinatorike daje broj takvih rasporeda formulom [M1991, N2016, E1915]

$$W = \frac{(N - P - 1)!}{(N - 1)!P!}. \quad (2-21)$$

Kompleksion (Boltzmannov naziv) je raspodjela statističkih objekata, koji se međusobno razlikuju, na položaje (kutije, spremnike) koji se međusobno razlikuju. Ako se, međutim elementi ne razlikuju, tada rezultat valja podijeliti s brojem permutacija tih elemenata i podijeliti s brojem permutacija položaja. Tako, primjerice, za  $P = 4$  (broj energijskih elemenata, danas bismo rekli broj kvanata) i  $N = 2$  (broj oscilatora) imamo  $W_2 = 5!/(1! \cdot 4!) = 5$  sa strukturom  $\{(4, 0) (3, 1) (2, 2) (1, 3) (0, 4)\}$ .

Da bi povezoao entropiju i vjerojatnost  $W$  raspodjele energije po broju rezonatora  $N$  on je slijedio Boltzmanov izraz. Brojevi  $N$  i  $P$  su golemi pa je prirodno zanemariti jedinice u izrazu (2-21) koji daje broj načina kako se energija raspodjeljuje na  $N$  rezonatora. Tako je dobio opis  $N$  izvora frekvencije  $\nu$  uz ukupnu energiju  $U_N$ , a energija svakog izvora (dipola koji titra) je  $\varepsilon$  tako da je ukupna energija jednaka

$$U_N = NU = P\varepsilon. \quad (2-22)$$

Kako se radi o diskretnoj raspodjeli, Planck je, kao međukorak, uzeo da je  $U_N = N\varepsilon$  i  $U_N = P\delta$ , gdje je  $\delta$  energija koju nosi pojedini oscilator. Prema svemu sudeći,  $\delta$  za Plancka (još) nije kvant energije, iako on to postaje u kasnijoj verziji tog istog računa. Vrijedi, dakle

$$U_N = N\varepsilon \quad \text{ i } \quad U_N = P\delta \quad (2-23)$$

tako da ukupna entropija  $S$  i entropija  $N$  oscilatora u jednoj konfiguraciji  $S_N$  imaju odnos  $S_N = NS$ . Iz formule (2-19) se dobije (vidjeti dodatak D2)

$$S = k \left[ \left(1 + \frac{\varepsilon}{\delta}\right) \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{\delta}\right) - \frac{\varepsilon}{\delta} \ln \frac{\varepsilon}{\delta} \right] \quad (2-24)$$

Kada se iz gornjeg izraza izračuna “brzina promjene entropije”, dobije se

$$\frac{d^2 S}{d\varepsilon^2} = -\frac{k}{\varepsilon(\varepsilon + \delta)}. \quad (2-25)$$

Gornji rezultat u potpunom je suglasju s ranijim izrazom (2-13) koji smo nazvali “eksperimentalna teoretska fizika”, no ovdje je izraz izveden slijedeći standardna termodinamička razmatranja. Usporedbom odgovarajućih članova vidimo da možemo napisati  $A = k$  (Boltzmannova konstanta) i  $B = \delta$ . Spektralna gustoća zračenja jednaka je

$$f(\nu, T) = \left[ \frac{c}{4} \right] \frac{8\pi\nu^2}{c^2} U \quad (2-26)$$

a unutarnja energija dana je od ranije ovako

$$U = \frac{B}{e^{B/kT} - 1}. \quad (2-27)$$

Također smo vidjeli da je unutarnja energija linearno proporcionalna frekvenciji, tj.  $B = h\nu$  gdje je  $h$  (neka nova) konstanta koju valja odrediti iz eksperimenta. Jasno, vidimo da ovdje govorimo o Planckovoj konstanti  $h$  tako da možemo napisati

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{hc}{\lambda} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (2-28)$$

i spektralna gustoća zračenja je

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (2-29)$$

Planck je dobio fantastičnu formulu koja u potpunosti slijedi eksperimentalne rezultata, ali u kojoj figurira energija koja ima definitivnu veličinu. Tu energiju Planck je uveo kao pomoćnu veličinu, a ne kao “zrnice energije” koje se ne može dalje dijeliti. On je bio pripadnik škole fizike koja je negirala takve skokovite pojave i koja je slijedila princip *Natura non facit saltus*. (To je i u skladu s Darwinovom teorijom evolucije, koja govori o postepenim promjenama koje dovode do novih oblika.) Poznato je i da je Planck bio nesklon slijediti Boltzmanove ideje atoma pa je kao editor uglednog časopisa imao niz nesuglasica i čak i sukoba s autorima koji su promovirali atomističke ideje. Ipak, u jednom je trenutku Planck prihvatio “kvant energije” (koji je 1905. godine uveo Einstein). Točni zaokret u Planckovom razmišljanju nije moguće identificirati jer je niz Planckovih pisanih dokumenata stradao (izgorio) u Berlinu 1944. godine pri bombardiranju. Postoji niz autora (Kuhn, primjerice [K1978]) koji u potpunosti odriču Plancku ideju o kvantizaciji energije, iako je u kasnijim tekstovima Planck sasvim prirodno raspravlja o kvantima energije.

Bez obzira na pravu stranu stava o kvantizaciji, ostaje trajni doprinos M. Plancka kvantnoj teoriji kroz njegov rad u termodinamici, tako da i u tekstovima u kojima se jednostavnu uvodi činjenica da je (prema Plancku!) energija kvantizirana, ostaje bitan rezultat za koji danas znamo da je prisutan u korijenima kvantne fizike.

### 3. Razvoj kvantnih ideja nakon Plancka

Rezultat gore opisanih istraživanja bio je na određen način izoliran od većeg dijela ostale fizike, tako da taj rezultat nije i bio potpuno ugrađen ili čak prihvaćen u spektar fizikalnih znanja. Međutim, postepeno je dolazilo do novih istraživanja koja su pokazivala da je uvođenje kvantne predodžbe u mikroskopske pojave nužda. Ovdje ćemo dati samo kratak pregled pojava i rezultata koji u sebi nužno nose predodžbu kvantnog.

A. Einstein je (1905.) pri istraživanju fotoefekta uveo kvant svjetlosti - foton koji nosi sve karakteristike Planckovog “zrnca energije rezonatora izotermne šupljine” čija je energija upravo jednaka umnošku Planckove konstante i frekvencije svjetlosnog vala

$$E_{\text{foton}} = h\nu. \quad (3-30)$$

Tako je na scenu stupio foton - kvant svjetlosti - čestica koja sudjeluje i u fotoefektu ali i u raspršenjima kojima se bavi (klasična) teorija elektromagnetskih valova. Kvantizacija se počela afirmirati kao princip pristupa mikroskopskoj fizici.

Pri raspršenju visokoenergijskih zraka (EM valova) A. H. Compton je (1923. godine) pokazao da je za objašnjenje nužno uvesti foton gore dane energije, uz relativističko tretiranje kinematike i dinamike procesa danas poznatog kao Comptonovo raspršenje. Prije toga (1897. godine) je J. J. Thomson otkrio (prvu elementarnu česticu) elektron, čiju je masu i naboj kasnije istraživao Millikan. Taj relativistički elektron međudjeluje s (kvantnom) česticom svjetlosti fotonom i pokazuje učinke koji se mogu opisati upravo kvantnom prirodom zračenja - svjetlosti.

Mjerenja spektara (valnih duljina, intenziteta, polarizacije) čiji su rezultati bili toliko dragocjeni Plancku pri istraživanju termodinamike apsolutno crnog tijela, pokazivali su da je svjetlost emitirana iz atoma u čije postojanje vjerovalo je sve više istraživača fizičara i kemičara. Prve modele atoma koje su imale nekog kvantitativnog smisla dali su J. J. Thomson i E. Rutherford. Prvi planetarni model atoma dao je upravo Rutherford analizirajući pokus raspršenja  $\alpha$ -čestica na folijama zlata.

Iz planetarnog modela atoma i na osnovu ranijih radova Fraunhoffera, Kirchhoffa, Fresnela i Balmera te pomoću klasičnih jednadžbi gibanja elektrona oko atomske jezgre građene od protona (kojeg je otkrio E. Rutherford), N. Bohr je postavio tri postulata koji su opisivali vodikov atom, gdje bitnu komponentu čine fotoni odgovarajućih energija te, možda još bitnije, on uvodi kvantizaciju kutne količine gibanja, veličine koju znamo iz klasične mehanike i čije značenje dobro razumijemo u klasičnoj fizici. Međutim, prema Bohrovima postulatima, ta (bitno klasična) veličina je kvantizirana! Model atoma tako uokviren, dao je niz dobrih rezultata ali mnogo tog je ostalo neriješeno. Iako ima elemente kvantizacije u sebi, taj model vrlo često zovemo *poluklasični model* atoma.

Potaknut dvojnomo slikom svjetlosti - elektromagnetski val i foton - L. de Broglie je pretpostavio da je i "obična tvar" dualna, tj. da kao što za foton možemo uvesti i (mehaničku) količinu gibanja i (valnu) duljinu, to možemo učiniti i, primjerice, elektronu, ali i nogometnoj lopti, ili automobilu. Jasno, sve te predodžbe postaju važne tek na mikroskopskoj razini, no one vode na potrebu pronalaženja nekakvog dinamičkog principa koji će u odgovarajućoj teoriji pokazati da pridruživanje valnih svojstava mikroskopskim česticama ima smisla. Tako je začet put traženja valne jednadžbe koja bi opisala česticu valnih svojstava odnosno val čestičnih svojstava.

Pronalaženje rješenja gornjeg problema odigralo se na dva načina: W. Heisenberg je (1925. godine) složio matematički model zvan *matrična mehanika*, a E. Schrödinger je (1926. godine) konstruirao valnu jednadžbu čije rješenje daje niz odgovora na probleme dinamike mikroskopskih procesa. Bitna komponenta tih teorija je kvantizacija klasičnih fizikalnih veličina (kutna količina gibanja, energija) ali i uvođenje novih ne-klasičnih veličina (spin) nužnih za razumijevanje procesa mikroskopske razine.

#### 4. Kvantna mehanika od E. Schrödingera do danas

Napori niza teoretskih fizičara tek skicirani u prethodnom odjeljku doveli su, dakle, u jednom trenutku do stvaranja teoretskog okvira koji danas zovemo u pravom smislu riječi kvantna mehanika. W. Heisenberg je 1925. godine radeći zajedno s M. Bornom i P. Jordanom formulirao teoriju koja je na pomalo matematički zamršen način dovela do opisa mikroskopskih procesa i tu formulaciju zovemo matrična mehanika, a godinu dana kasnije je Erwin Schrödinger predložio valnu jednadžbu koja je predstavljala matematički okvir koji je prvo dobio naziv valna mehanika. Te dvije verzije teorije mikroskopskih procesa pokazale su se ekvivalentnim, no matematički privlačnija Schrödingerova formulacija je prevladala i danas je ona dobila svoj naziv kvantna mehanika [S1985,W2022].

Prema tome, E. Schrödinger je pretpostavio da se ponašanje "elektronskog vala" može dobiti rješavanjem valne jednadžbe oblika

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \left( \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial z^2} \right) + V(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (4-31)$$

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}}$$

gdje je  $m_e$  masa elektrona,  $\Psi$  je *valna funkcija* elektrona, a  $V(\mathbf{r}, t)$  je potencijalna energija. Jednadžba (4-31) je vremenski zavisna Schrödingerova jednadžba napisana u Kartezijevim koordinatama.

Kinetička energija  $E_k = p^2/2m$  ima u Kartezijevim koordinatama  $(x, z, y)$  oblik

$$E_k = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla \nabla = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right), \quad (4-32)$$

a u, primjerice, sfernim koordinatama  $(r, \theta, \phi)$  ona je dana ovako

$$\begin{aligned} E_k &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] \\ &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \Delta_{\theta, \phi} \\ &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{2mr^2} \mathbf{L}^2 \end{aligned} \quad (4-33)$$

gdje je (operator) kutne količine gibanja dan izrazom iz klasične mehanike  $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ , a izračunat prijelazom iz Kartezijevih u sferne koordinate. Ako se, nadalje, sjetimo da je moment tromosti  $I$  materijalne točke mase  $m$  jednak  $I = mr^2$ , tada zadnji član u gornjoj jednadžbi izgleda ovako

$$E_{k/\text{rot}} = \frac{L^2}{2I} \quad (4-34)$$

i predstavlja upravo kinetičku energiju rotacije.

Kao i uvijek u situacijama kada rješavamo jednadžbe gibanja, moramo specificirati *rubne uvjete*. Ovdje, međutim, moramo posvetiti nekoliko riječi interpretaciji rješenja gornje jednadžbe, interpretaciji *valne funkcije*  $\psi(t, x)$ , jer očito nešto s njom nije uredu s fizikalnog gledišta: s obzirom na to da je valna jednadžba kompleksna, tako će i njezino rješenje, valna funkcija  $\psi(t, x)$  također biti kompleksna funkcija koordinate i vremena! To znači da ona ne može opisati primjerice, gibanje elektrona, jer je besmisleno kazati da je položaj elektrona, primjerice 3 i metra od ishodišta (gdje je  $i^2 = -1$ ), ili da je elektronu trebalo 2 i sekunde da prevali neki put. Očito da (kompleksna) valna funkcija  $\psi(t, x)$  nema direktnu fizikalnu interpretaciju. Taj problem riješio je M. Born<sup>†</sup>, koji je 1926. godine u časopisu *Zeitschrift für Physik* objavio dva članka o interpretaciji valne funkcije: on je uveo tzv. "probabilističku interpretaciju" (odnosno "vjerojatnostnu interpretaciju"), ili "statističku interpretaciju" koja, ukratko, znači da valna funkcija  $\psi(t, \mathbf{r})$ , kao općenito kompleksna funkcija vremena i koordinata, nema direktnu fizikalnu interpretaciju, nego (jedini) smisao ima apsolutni kvadrat valne funkcije  $|\psi(t, \mathbf{r})|^2$  koji nam govori o *vjerojatnosti* nalaženja kvantnomehaničke čestice, odnosno izraz

$$|\psi(t, \mathbf{r})|^2 dV \quad (4-35)$$

---

<sup>†</sup> Max Born (1882.-1970.) njemački fizičar koji je djelovao u Göttingenu i Frankfurtu na Maini, a napustio je Njemačku za vrijeme nacističke vladavine i proveo dio vremena u Škotskoj, da bi se ponovno vratio u Njemačku 1953. godine.

nam daje *vjerojatnost* da se kvantnomehanička čestica opisana valnom funkcijom  $\psi(t, \mathbf{r})$  nađe u djeliću volumena  $dV$  u trenutku  $t$ . U jednoj dimenziji, izraz

$$|\psi(t, x)|^2 dx \quad (4-36)$$

daje *vjerojatnost* da se kvantnomehanička čestica opisana valnom funkcijom nađe na osi  $x$  između položaja  $x$  i  $x + dx$ , u trenutku  $t$ . Prema ranijem,  $|\psi(t, x)|^2$  je *gustoća vjerojatnosti*. Kada je “pozbrajamo” preko cijelog raspona mogućeg prostora, točnije, kada integriramo preko cijelog prostora, moramo dobiti ukupnu vjerojatnost (nalaženja čestice) koja mora biti jednaka jedinici (jer je ukupna vjerojatnost svih mogućih ishoda nekog događaja koji razmatramo, jednaka jedan). Dakle,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t, x)|^2 dx = 1 \quad \text{ili} \quad (4-37)$$

$$\int_{\text{cijeli volumen } V} |\psi(t, \mathbf{r})|^2 dV = 1.$$

Kažemo da je valna funkcija normirana. Takva probabilistička - statistička ili, popularno, *Kopenhaška interpretacija* valne funkcije (a time i kvantne mehanike) izazvala je odmah velike rasprave među znanstvenicima (pa i filozofima, koji, međutim, nisu nikad u potpunosti razumjeli kvantnu mehaniku), te i danas, nakon mnogo desetljeća postojanja, još uvijek postoje ideje da se pokuša izvući “nešto više od same vjerojatnosti”. Povijesno je poznato dugo nadmudrivanje A. Einsteina (protivnika) i N. Bohra (zastupnika kvantne mehanike), koje je uvijek završavalo Bohrovom “pobjedom”, bez obzira na Einsteinove uporne pokušaje da eliminira ovakvu verziju kvantne mehanike i njezinu statističku interpretaciju. Bez obzira na sve zamjerke i neke paradokse i nejasnoće, kvantna mehanika uspjeva opisati mikroskopski svijet atoma, procesa u atomu, molekule, njihovo međudjelovanje, spektre, vodiče, poluvodiče, magnetizam, nuklearnu strukturu i procese, strukturu zvijezda itd. Proširenje na relativističku mehaniku, odnosno relativističku teoriju polja, dakle na relativističku kvantnu mehaniku i kvantnu teoriju polja, omogućilo je formuliranje teorije i praktične proračune elementarnih procesa na razini elementarnih čestica. Također su napravljeni proračuni fizikalnih veličina takve preciznosti koja nije postignuta nikad, nigdje ni u jednoj ljudskoj aktivnosti. Prema tome, unatoč određenim kontroverzama, kvantna mehanika je najbolje što (u ovom trenutku?) imamo i zanimljivo je pogledati skice nekih njenih rezultata koji su povezani s eksperimentalnim podacima s kojima se ti rezultati slažu. Svakako, pravi proračuni zahtijevaju pravi studij te fantastične teorije, ali ovdje možemo prikazati neke njezine zanimljive aspekte te razumjeti snagu i pragmatičnost njenih argumenata [A2004, D1960, W2022].

Vidimo da Schrödingerovala jednadžba doista slijedi klasično mehaničke veličine, međutim, uvodi neka zamjene, poput kinetičke energije koja prestaje imati klasični oblik već postaje druga derivacija po koordinati, itd. Za razumijevanje tih novih zapisa valja se obratiti nizu postulata, postulata kvantne mehanike [R2007, S1985].

## Postulati kvantne mehanike

Postulati kvantne mehanike ne mogu se izvesti iz klasične mehanike, već su oni opći principi sadržaja i odvijanja mikroskopskih procesa koji su aposteriori uvedeni, nakon što su fizičari naučili strukturu i sadržaj kvantne mehanike. Oni, dakle, služe za sistematiziranje i organiziranje znanja o kvantnomehničkom formalizmu. U literaturi možemo naći različit broj postulata, formuliranih na različite načine. Mi ćemo ovdje pokušati minimalnim brojem postulata dati okvire kvantnoj mehanici i sadržaj kvantne mehanike, a to će nam pomoći da razumijemo njenu dinamiku i interpretaciju. Vidjet ćemo kako se formalizam kvantne mehanike prirodno povezuje s matematičkim formalizmom uvedenim kasnije.



Prema tome, postulati kvantne mehanike daju:

- (1) pravila za određivanje *valne funkcije*  $\psi(x, y, z, t)$ ,
- (2) interpretaciju valne funkcije,
- (3) načine uvođenja fizikalnih veličina - opservabli u kvantnomehantički formalizam,
- (4) pravila za računanje očekivanih (srednjih) vrijednosti opservabilnih veličina pomoću valnih funkcija.

### POSTULAT 1

Svakom fizikalnom stanju kvantnomehantičkog sustava pripada *valna funkcija* (u jednoj dimenziji  $\psi(x, t)$ , a u tri dimenzije  $\psi(\mathbf{r}, t)$ ) koja sadrži sve podatke o stanju fizikalnog sustava odnosno u potpunosti određuju kvantni sustav. Valna funkcija pripada (beskonačno dimenzionalnom) Hilbertovom prostoru  $\mathcal{H}^{(\infty)}$  funkcija i ona je kvadratno integrabilna kompleksna funkcija svojih argumenata.

### POSTULAT 2

Svakoj fizikalnoj veličini pridružujemo operator. Operatori fizikalnih veličina su linearni i Hermitski. Fizikalne jednačbe u kojima se nalaze te fizikalne veličine postaju operatorske jednačbe (diferencijalne jednačbe) najčešće vlastitih vrijednosti. Vlastite vrijednosti Hermitskih operatora koji pripadaju fizikalnim veličinama su mogući rezultati mjerenja tih fizikalnih veličina. Odmah nakon mjerenja fizikalne veličine, sustav će biti u stanju koje je opisano vlastitom valnom funkcijom koja odgovara izmjerenoj vlastitoj vrijednosti.

### POSTULAT 3

Srednja ili očekivana vrijednost neke fizikalne veličine  $A$  u nekom stanju fizikalnog sustava  $\psi$  dobije se tako da se izračuna srednja vrijednost pripadnog Hermitskog operatora  $\hat{A}$ , tj.

$$\langle A \rangle_\psi = \overline{A}_\psi = \int \psi^* \hat{A} \psi dV \quad (4-38)$$

gdje se integral proteže preko područja u kojem promatramo fizikalni sustav.

### POSTULAT 4

Vremensko odvijanje fizikalnog sustava opisanog valnom funkcijom (napisanoj u jednoj dimenziji)  $\psi(x, t)$  dano je rješenjem Schrödingerove jednačbe

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \hat{H}(x, t) \Psi(x, t) \quad (4-39)$$

gdje je  $H(x, t)$  ukupna energija - *hamiltonijan* sustava, a  $\hat{H}$  je odgovarajući Hermitski operator.

Prema tome, valna jednačba, Schrödingerova jednačba je parcijalna diferencijalna jednačba drugog reda kojoj, za potpuno rješenje, valja specificirati rubne uvjete, a sa stanovišta fizikalne predodžbe valja odrediti značenje njenih rješenja - valne funkcije koja, kao što smo vidjeli u prethodnim primjerima, općenito može biti i kompleksna. Također moramo razumjeti kako možemo dobiti podatke o fizikalnim veličinama koje nam opisuju naš kvantnomehantički sustav. Tu se javlja i problem mjerenja u kvantnoj mehanici koji je tek naznačen u postulatu 3.

Problem mjerenja kvantnog sustava i “izvlačenja” mjernog podatka iz njega je tema koja se proteže od samih početaka formulacije te teorije [D1960]. Vrlo često se spominje i način kako se možemo pomiriti s tom situacijom, tj. kaže se: “znamo što možemo, znamo što dobijemo, ali ne razumijemo zašto to možemo i zašto to smijemo”. Radi se, dakle, o međudjelovanju makroskopskog mjernog uređaja i mikroskopskog (kvantnog) sustava. Taj mikroskopski sustav mora promijeniti makroskopski mjerni sustav, a istovremeno mjerni sustav djeluje i na kvantni sustav. Time se stvara kompleksni odnos mikro-makro, a s obzirom da znamo kvantni zapis (valnu funkciju) mikroskopskog sustava moramo znati na isti ili sličan način opisati makroskopski (klasični) sustav. To se postiže pretvaranjem klasičnog sustava u “kvantnu omotnicu” koja ostaje nezavisna od kvantnog sustava sve dok nema međudjelovanja i klasični sustav je svojevrsna

projekcija kvantne omotnice pomoću varijabli klasičnog sustava. Pri mjerenju, kvantne veličine koje imaju svoje odgovarajuće partnere u kvantnoj omotnici, mijenjaju ih i tako projiciraju kvantnu omotnicu na klasični sustav u kojem, jednostavno očitavamo (klasične) rezultate mjerenja kvantnog sustava. Naj taj je način klasični sustav ostao neperturbiran, a kvantni sustav međudjelovanjem biva projiciran u jedno od vlastitih stanja kvantnog operatora čiju smo klasičnu veličinu mjerili. Postoje, jasno, mnogo radikalnije interpretacije rezultata mjerenja kvantnih sustava. Tu se valja ponovno podsjetiti citata S. Weinberga koji spominje zapanjujuće rezultate kvantne mehanike i njenu sveobuhvatnost, usprkos problemima interpretacije procesa mjerenja. Da se doista radi o teoriji koja i dalje intezivno živi valja se podsjetiti i Nobelove nagrade dodijene za rješenje sličnih problema kvantne fizike, ali i nastavka te iste (za neke kontroverzne) teorije u područje tehnologije, teme koja nas zaokuplja u sljedećem odjeljku.

## 5. Kvantne tehnologije

Kvantna mehanika je teorija mikroskopskih pojava i struktura dok nam neposredna slika tehnologije najčešće nameće slike makroskopskih objekata poput kosilica, strojeva za pranje rublja, automobila, aviona i sličnog. Svakome je jasno da kroz stoljeća razvoja civilizacije postoji stalna (ponekad i spora) difuzija znanstvenih spoznaja i rezultata u praktičnu primjenu, tj. simbioza znanosti i tehnike - tehnologije nije nikad bila upitna. U takvim je već postojećim situacijama teško razlučiti gdje prestaje (čista) znanost, a gdje počinje tehnologija. I nedavna otkrića mikroskopske - kvantne razine dovela su do tehnoloških rješenja koja su u vidu lasera, nuklearne magnetske rezonance, supravodljivosti, tranzistora i kompleksnijih poluvodičkih struktura ugrađena u naš svakodnevni život. Ipak, današnja situacija, odnosno naslov ovog odjeljka "kvantne tehnologije" ne slijedi taj skoro neosjetni proces difuzije već se radi o jednom gotovo "kvantnom skoku" od fizikalno- matematičke strukture kvantne fizike (skicirane u prošlom odjeljku) do neposrednih tehnoloških rješenja.

Kvantne tehnologije su područja preklapanja kvantne fizike i tehnologije u kojem se kvantni principi i svojstva, poput superpozicije i spletenosti primijenjuju na tehnološka područja poput računarstva, informacijske tehnologije, komunikacija, umjetne inteligencije, robotike, medicine, farmacije, pa sve do istraživanja svemira. Niz zemalja stvara centre kvantne tehnologije koji zatim, izdašno financirani, djeluju u nekim glavnim smjerovima koje ovdje navodimo:

- 1 Kvantno računarstvo;
- 2 Kvantna kriptografija;
- 3 Kvantna simulacija;
- 4 Kvantna metrologija;
- 5 Kvantne informacije;
- 6 Kvantna kontrola.

(Valja ovdje naglasiti da gornja podjela ima i područja preklapanja, ali i da nedostaju neka (uža) područja koja su utopljena u neko od gornjih.)

Jednostavnim pretraživanjem interneta uz pojam "Quantum technologies" ili "Quantum Information Centre" dolazimo do miliona "pogodataka" koji pokazuju da je, posebno u zadnjih dvadesetak godina, došlo do nedvosmislenog približavanja nekoć nespojivih područja. Već afirmirana nanotehnologija u stvari nije ništa drugo nego kvantna mehanika (koja "radi" upravo na nano-razini), tako da i u drugim po nazivu manje evidentnim područjima, postoji takva primjena kvantnog u tehnološke svrhe. Osim državnih subvencija za kvantne tehnologije, javlja se niz golemih tehnoloških kompanija poput Google, IBMa, Microsofta, DWavea, Tshibe itd. koji izdvajaju goleme iznose za istraživanja kvantnih tehnologija, a i realizaciju postojećih kvantnih komponenti uređaja koji pripadaju gornjim područjima. Europska Unija je alocirala golemu sredstva upravo na gore navedene teme i stimulira stvaranje centara za kvantne

tehnologije. Tražilice interneta pronaći će dokumente pod nazivom Quantum Roadmap koji opisuju korake učinjene u tom smjeru. Koraci opisani u popisu glavnih smjerova istraživanja ponekad se zove i “druga kvantna revolucija”, dok je ona prva, pretpostavljamo, bila ona pri stvaranju “prave” kvantne mehanike od Heisenberga, Schrödingera, Paulija i Diraca.

Kvantno računarstvo ostavljamo za kraj ovog odjeljka, dok spominjemo primjerice kriptografiju koja bi u svojoj kvantnoj verziji omogućila sigurnost informacijskih sustava uvođenjem algoritama koji se izjavaju u okviru kvantnog računarstva.

Kvantna simulacija prije svega se odnosi na procese u okviru velikih dinamičkih sustava poput zračnog prometa i automobilskog prometa, raspodjele i upravljanja (telekomunikacijskim) satelitima, ali posebno je zanimljivo alociranje lijekova u organizmima i njihova ciljana primjena te simulacija ishoda. Za ostvarivanje kvantne simulacije važno je konstruirati kvantni generator slučajnih brojeva (QRNG), a tu se odmah nameće i umjetna inteligencija (AI) koja svojom sveobuhvatnošću mora biti prije njenog uvođenja temeljito istražena upravo kvantnom simulacijom. Kvantne simulacije povezane su i s vremen- skim prognozama za koje se danas rabe golemi klasični računalni resursi koji bi u kvantnim protokolima mogli davati pouzdane rezultate.

Kvantna kriptografija predstavlja važnu komponentu zaštite podataka, a akronim QKG znači kvantnu generaciju kodova (Quantum Key Generation), jer bi ostvarenje kvantnih računala upravo moglo omogućiti “razbijanje” sigurnosnih kodova generiranih klasičnim metodama.

Kvantne informacije i kvantne komunikacije imaju između ostalog oformiti kvantni internet koji bi zajedno s umjetnom inteligencijom omogućio pristup i istovremenu obradu golemog broja informacija. Tu svakako treba spomenuti (nespomenutu) kvantnu optiku koja se oslanja na istraživanje materijala za (kvantne) komunikacije.

Kvantna metrologija povezana je s najvažnijim dijelom (fizikalnih i tehničkih) istraživanja, a to je mjerenje. Postoji niz ograničenja modernih mjernih instrumenata koji bi primjenom kvantnih verzija povećali preciznost, brzinu odaziva i mjerenja doveli u područja koja su danas nedostižna (ekstremno visoke ili ekstremno niske temperature, tlakovi i sl.). Nadalje, u kvantnoj metrologiji bi se izbjeglo međudjelovanje mjerenog sustava i instrumenta koje na osjetljivim režimima mjerenja mijenja uvjete mjerenja te daje tako manje pouzdane rezultate. Na klasične senzore javlja se limit preciznosti zvan *standardni kvantni limit* -  $SQL$  koji pokazuje promjene preciznosti proporcionalno korijenu iz broj čestica u senzoru, dok se vjeruje da bi se kod kvantnih senzora u Heisenbergovom limesu preciznost senzora ponašala proporcionalno broju čestica.

## Kvantno računarstvo

Kvantna računala su posebno zanimljivo područje kvantnih tehnologija [N2000, Y2008, K2020].

Kvantna računala provode račune s klasičnim bitovima 1 i 0, ali ti su bitovi uklopljeni u qubit - superpoziciju klasičnih bitova i unitarni procesi baratanja qubitima obećavaju ostvarenja niza prednosti nad klasičnim računalima. Unitarnost kvantnih procesa koji tvore kvantne mreže i kvantne algoritme jest u tome da je, upravo zbog unitarnosti, moguće provoditi procese u jednom i drugom smjeru (početak→kraj, ili kraj→početak). Zato je sinonim kvantnom računarstvu reverzibilno računarstvo. Princip unitarnosti poznat je u kvantnoj fizici i jedan je od bitnih kriterija niza procesa koji su prihvaćeni ili odbačeni upravo zbog njihove ne-unitarnosti ili unitarnosti, što je nadalje povezano s renormalizacijom u kvantnoj teoriji (polja).

Jedan od ciljeva kvantnog računarstva je “kvantna nadmoćnost” (“Quantum Supremacy - QC”) koja bi značila nadmašivanje klasičnog računala kvantnim, i u brzini i u pouzdanosti i u širini primjena (ali prije svega u brzini).

Za realizaciju kvantnog računala rukovodi se kriterijima danim od poznatog istraživača kvantnih računala i kvantnog računarstva (po kome se zove i jedan kvantni algoritam) a to je Di Vicenco. On je postavio kriterije koji daju smjernice razvoja kvantnog računala. Prvi je postojanje skupa qubita, čiji se broj može umnažati po potrebi. Qubit je moguće na više načina ostvariti (spin fermiona, foton date polarizacije, ion itd.), no najvažnije je vrijeme koherencije, tj. vrijeme kroz koje se qubit održava u stabilnom jednom definiranom stanju. Po drugom kriteriju to vrijeme koherencije mora biti dulje od procesa u kojem qubit aktivno sudjeluje. Qubit priređen u željenom početnom stanju mora proći kroz kvantne mreže, univerzalna kvantna vrata i kvantne algoritme te mora na kraju biti izmjeren. Mora biti omogućen prijenos qubita, a kao i kod klasičnih računala potrebno je uvesti protokole o ispravljanju grešaka kojih bi moglo biti s obzirom na koherenciju i više od broja grešaka klasičnih računala.

Danas se broj qubita u realizacijama kvantnih računala, a koji ulaze u kvantne algoritme neprestano povećava, a smatra se da računalo koje bi moglo ući u utrku za QC (Quantum Supremacy) mora moći kontrolirati više od 1000 qubita, što za sada još nije postignuto. Ipak, usprkos tome, već je konstruiran niz kvantnih algoritama koji u ovom trenutku rade s malim brojem qubita, ali njihov unitarni hod nije ograničen na određen broj qubita tako da je za niz primjena algoritamska strana kvantnog računarstva pripremljena.

Navedimo ovdje samo neke algoritme koji isključivo nose imena svojih tvoraca. *Deutschev ili Deutsch-Jozsa* algoritam koji pokazuje kako je moguće odrediti vrijednost nekog bivalentnog ishoda uz najmanji broj provjera (pismo-glava i sl.).

*Shoreov algoritam* kojim se faktorizira (neprost) broj i koji ima posebnu važnost u kriptografiji. Pri tome se javlja i *kvantni Fourierov transform* kao dio metode Shoreovog algoritma.

*Groverov algoritam* kojim se istražuje baza podataka koja sadrži određeni niz qubita.

*Simonov algoritam*, *Bernstein - Vazirani algoritam*, itd.

Vrlo je zanimljiv u kvantnom računarstvu *teorem o ne-kloniranju* koji pokazuje da nije moguće jedan qubit "umnožiti" - klonirati. Nadalje, problem *teleportacije* riješen je kvantnom računarstvu kroz niz algoritama koji pokazuje kako je moguće jedan qubit prenesti (teleportirati) tako da se, uz kvantni reverzibilni proces, uspostavi klasična komunikacija između pošiljaoca i primaoca, a ta (klasična) komunikacija nikako ne može otkriti vrstu teleportiranog qubita.

Razvoj kvantnog računarstva vezan je uz konstrukciju kvantnog računala. U ovom je trenutku moguće pristupiti nekim adresama na internetu koje omogućavaju "igranje" s qubitima i provođenje nekih kvantnih procedura uz primjenu univerzalnih kvantnih vrata i kvantnih algoritama. Vjeruje se da će ubrzo biti konstruirano kvantno računalo koje bi moglo krenuti u smjeru postizanja "svetog grala" kvantnog računarstva, a to je "kvantna nadmoćnost".

## 6. Epilog

U tekstu je skiciran razvoj kvantne mehanike, s posebnim osvrtom na termodinamičko porijeklo prve konceptualno čiste kvantne formule, koja je izašla iz klasičnog razmatranja klasične termodinamike i Boltzmannove atomističke ideje koja prije nije našla svoj put do afirmirane fizikalne teorije. M. Planck je slijedeći svoj termodinamički pristup uz Boltzmannovu statističku sliku toplinskih pojava, u koju, izgleda ni sam nije vjerovao, izveo izraze koji su nedvosmisleno vodili na mikroskopsku teoriju koja je narušila principe klasične fizike ali i dovela do "prve kvantne revolucije". Prijelaz od Plancka prema današnjoj formulaciji kvantne mehanike omogućio je Einstein proučavanjem fotoefekta i uočavanjem fundamentalno novih predodžbi koje je odmah ugradio u svoju teoriju. Niz vrsnih teoretičara fizike prihvatio je ideje Einsteina i uz formalizam Planckovih radova, došao je do stvaranja teorije koja je pokazala da joj je dostupan golem broj mikroskopskih procesa, ali i koja je cijelo vrijeme ostavljala nekakav tjeskobni utisak da možda ipak "tu nešto nedostaje". Upravo zbog tog utiska, a usprkos fantastičnim rezultatima kvantne mehanike, ona ostaje jedna od nepresušnih tema i istraživanja i raspravljanja, posebno u današnjoj

situaciji kada je i tehnologija prepoznala niz mogućnosti koje pruža kvantni pristup pojavama. Tako je i nastala sintagma *kvatna tehnologija*, koja je prerasla svoje oksimoronsko razdoblje i postala doista simbioza suvremene tehnologije i fundamentalnog istraživanja mikroskopskog svijeta.

Zanimljivo je pogledati kako su neki istraživači gledali na budućnost kvantne fizike, ali i budućnost tehnologije koja bi mogla biti, ili već je bazirana na kvantnim principima. Ta se razmišljanja možda mogu sažeti u riječi jednog poznatog fizičara D. Mermina, koautora izuzetne knjige iz fizike čvrstog stanja [A1976] ali i niza lekcija i izvrsne knjige iz kvantnog računarstva [M2007] koji je dao interview fizikalnom časopisu ne tako davne 2021. godine. On je bio upitan kojih bi on 10 pitanja rado postavio svojim kolegama u godini 2100. Neki od njegovih odgovora sjajno opisuju sadašnju situaciju koja se, moglo bi se naslutiti, prepoznaju u današnjem trendu istraživanja u fizici i njenoj vezi s tehnologijom. Dakle, jedno pitanje je (otprilike): koja su imena glavnih ravojnih grana znanosti? Dalje (nama ovdje posebno zanimljivo) pitanje je: da li su fundamentalne teorije još uvijek postavljene na principima superpozicije stanja koja se vremenski odvijaju djelovanjem unitarnih operatora, ili su osnovni principi kvantne fizike (bili) zamijenjeni? Da li je kvantna mehanika preživjela svo to vrijeme, da li su istraživači postigli konsenzus o problemima interpretacije ili su se prestali time baviti kao problemom? Da li se pojavila neka alternativna teorija koja ne pati od istih nedoumica i da li je teorija koja ju je zamijenila razjasnila stare probleme ili i ona nosi sa sobom nešto slično? Nadalje, da li problem prostora i vremena koji muči ljude - istraživače od 20. i u 21. stoljeću i dalje predstavlja zagonetku? I, konačno njegovo “novo” područje interesa: da li je netko sagradio kvantno računalo koje može faktorizirati 1000 bitni cijeli broj? Da li se ono rabi za još nešto? Da li ga ima svako kućanstvo?

Postoji trajni konsenzus da je istraživanje novih materijala siguran vodič u primjenu kvantne mehanike na razvoj moderne tehnologije. To se prvenstveno odnosi na visokotemperaturnu supravodljivost, koja je našla svoju primjenu u fundamentalnim istraživanjima fizike visokih energija (CERN, LHC), ali za koju u ovom trenutku nema odgovarajuće kvantne teorije. Također se vjeruje da bi istraživanje fuzije, ponovno uz visokotemperaturnu supravodljivost koja bi omogućila magnetska polja velikih iznosa, moglo dovesti da rezultata vezanih u kvantnu kromodinamiku u kojoj se istražuje kvarkovsko-gluonska plazma. Nadalje, vjeruje se da bi umjetna inteligencija, sa svim svojim golemim prednostima (ali i opasnostima?) mogla omogućiti napredak tehnologije uz naznaku uloge, prije svega, kvantne fizike.

Sva ova pitanja nisu nam iznenađujuća, ali s obzirom da još nije godina 2100. mi se za sada ne brinemo oko odgovora na ta uznemiravajuća pitanja, iako radimo u smjeru njihovih razrješenja.

## Zahvala

Jedan od autora (D.H.) želi se zahvaliti kolegi i prijatelju dr. Zoranu Narančiću na nizu zanimljivih, ponekad i žućnih rasprava o temama koje prožimaju ovaj tekst. Nadalje, zahvaljujem mu se na nizu referenci i izvora koji su bitno utjecali na kvalitetu ovog teksta.

## DODATAK D1 - Planckov zakon zračenja crnog tijela i zakoni zračenja

### Dodatak D1.1

#### Planckov zakon zračenja apsolutno crnog tijela - uvod

U prosincu, točnije 14. prosinca 1900. godine M. Planck je prikazao Njemačkom carskom fizikalnom društvu rad o spektralnoj gustoći zračenja crnog tijela, u kojem je napravio pretpostavku o zračenju (harmoničkih) oscilatora koji su trebali modelirati zračenje crnog tijela. Ta pretpostavka je vodila na redukciju broja valova male valne duljine, a njezina suština je ta da oscilatori mogu apsorbirati i emitirati energiju samo u paketićima čija je najmanja veličina jednaka  $h\nu$ , odnosno to je minimalna energija koja se može emitirati ili apsorbirati. U tom je izrazu  $\nu$  frekvencija elektromagnetskog zračenja, a  $h$  je konstanta koju valja odrediti iz eksperimenta. Danas ta konstanta ima ime *Planckova konstanta* i ima vrijednost  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J·s. Svaka veća količina energije  $E$  dana je tek cjelobrojnim višekratnikom energije minimalnog paketića odnosno ako je energija  $E_0$  minimalnog paketića

$$E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (\text{D1-1})$$

onda je bilo koja viša energija  $E$  jednaka

$$E = 2 \cdot h\nu, \quad \text{ili} \quad E = 3 \cdot h\nu, \quad \text{ili} \quad E = 10^{15} \cdot h\nu \quad \text{ili općenito} \\ E = n \cdot h\nu. \quad (\text{D1-2})$$

Taj minimalni paketić energije zove se *kvant* energije, a  $n$  je broj kvantova energije. Kažemo da je energija *kvantizirana*, da ona više nije kontinuirana veličina nego je diskretna. Na osnovu te pretpostavke, da je  $E \propto \frac{1}{\lambda}$ , Planck je izveo formulu za spektralnu gustoću zračenja:

$$f(\lambda, T) = \underbrace{\left(\frac{c}{4}\right) \cdot \left(\frac{8\pi}{\lambda^4}\right)}_{\text{R-J}} \cdot \underbrace{\left(\frac{hc}{\lambda}\right) \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}}_{\text{Planck}} \quad (\text{D1-3})$$

tj.

$$\boxed{f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.} \quad (\text{D1-4})$$

Dok je osnovna pretpostavka izvoda Rayleigh-Jeansove formule bio teorem o ekviparticipiji energije koji kaže da svaki način titranja (tzv. stupanj slobode) doprinosi isti iznos energiji, i to  $kT/2$ , gdje je  $k$  Boltzmannova konstanta  $k = 1,381 \times 10^{-23}$  J/K, Plancku je bilo jasno da na male valne duljine otpada previše energije pa zato intenzitet postaje beskonačan. Zato je i tražio ovisnost energije o valnoj duljini sa svojstvom da je

$$f(\lambda, T) \rightarrow 0 \quad \text{za} \quad \lambda \rightarrow 0 \quad (\text{ili} \quad \nu \rightarrow \infty). \quad (\text{D1-5})$$

Prva dva faktora u formuli (s oznakom R-J) pripadaju (i) Rayleigh-Jeansovoj formuli, a zadnja su dva (Planckova) faktora u Rayleigh-Jeansovoj formuli jednaka  $kT$ .

### Dodatak D1.2

#### Planckov zakon zračenja apsolutno crnog tijela - izvod II

Prema Plancku, klasičnu relaciju za srednju vrijednost energije (po stupnju slobode)  $2 \times kT/2 = kT$  valja nadomjestiti relacijom koja će dati takve odnose koji će srednju energiju “gurnuti” u nulu, za male vrijednosti valne duljine  $\lambda$ , a to je, prema Plancku, moguće postići ako se pretpostavi da se energija emitira u malim paketićima - kvantima, čija je minimalna veličina proporcionalna frekvenciji,  $E \propto \nu$ , a konstanta

proporcionalnosti neka nosi oznaku  $h$ ,  $E = h\nu$ . Konstanta  $h$ , kasnije nazvana *Planckovom konstantom*, može se odrediti iz eksperimenta. To znači da energija koju izzrači (aposlutno crno) tijelo mora biti cjelobrojni višekratnik osnovne količine - kvantna, odnosno primjerice  $E_3 = 3 \cdot h\nu$  ili  $E_{17} = 17 \cdot h\nu$  itd. Prema tome, energija više nije kontinuirana veličina, ona ima “zrnatu” strukturu - ona je *kvantizirana*, a najmanji - osnovni kvant energije je  $h\nu$ , za određenu frekvenciju zračenja  $\nu$ . Pomoću takve nove predodžbe energije sada računamo srednju energiju, prema formalizmu statističke fizike.

*Račun srednjih vrijednosti - primjer* Razmatranjem srednje vrijednosti fizikalnih veličina vodi na najvažniju veličinu pri tim računima, na *funkciju raspodjele* koja i određuje tip (vrstu, ime) raspodjele. Na primjeru računa srednje vrijednosti ocjene lako je vidjeti kako radi funkcija raspodjele.

Moguće ocjene u našem obrazovnom sustavu su 2, 3, 4 i 5. (Varijacije “u imeniku” poput (-2) ili (+3) su samo privremeno pomagalo nastavniku.) Ocjene su “diskretne” veličine (kvantizirane), odnosno nisu *kontinuirane*. Za račun srednje ocjene valja znati njihovu *funkciju raspodjele*, odnosno koliko je kojih ocjena učenik (student) dobio. Primjerice, neka je (od ukupno 72 ocjena) dobio sedam dvojki, a to pišemo ovako  $f(2) = 7$ , nadalje, dobio je devet trojki  $f(3) = 9$ , dvadeset četvorki  $f(4) = 20$  i (ostatak do 72) 36 petica,  $f(5) = 36$ . Sada srednju ocjenu  $\bar{O}$  računamo pomoću funkcije raspodjele ocjena  $f(O_i)$ :

$$\bar{O} = \frac{\sum_{i=2,3,4,5} f(O_i) \cdot O_i}{\sum_{i=2,3,4,5} f(O_i)}, \quad \text{gdje je } O_2 = 2, O_3 = 3, \text{ itd. pa je}$$

$$\bar{O} = \frac{7 \cdot 2 + 9 \cdot 3 + 20 \cdot 4 + 36 \cdot 5}{f(O_1) + f(O_2) + f(O_3) + f(O_4) + f(O_5)} = \frac{301}{72} = 4,18, \quad (\text{D1-6})$$

odnosno, nazivnik je jednostavno jednak ukupnom broju svih ocjena (72) -  $f(2) + f(3) + f(4) + f(5) = 7 + 9 + 20 + 36$ , a brojnik daje ukupnu sumu svih ocjena pa je gornja formula u skladu sa “standardnim načinom” računa srednje ocjene: “zbroj ocjena kroz njihov broj”.

Na isti način sada možemo razmotriti račun srednje energije, osim što ćemo za nju uzeti da slijedi Boltzmannovu statistiku, odnosno funkcija raspodjele jednaka je Boltzmannovoj funkciji raspodjele

$$f_B(E) = C e^{-E/kT}, \quad (\text{D1-7})$$

gdje je  $C$  konstanta koju trenutačno ne moramo znati (jer će se pokratiti u računu). Ranije smo *srednju vrijednost energije* računali ovako:

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} f_B(E) E dE}{\int_0^{\infty} f_B(E) dE}, \quad (\text{D1-8})$$

kada je energija  $E$  mogla poprimati kontinuirani raspon vrijednosti (od 0 do formalno beskonačno). Planck je, međutim, pretpostavio *diskretnost* (“zrnatost”) energije pa je, prema ranije rečenom:

$$E \rightarrow E_n = nh\nu \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{D1-9})$$

Dakle, sada računamo *srednju vrijednost (diskretne) energije*:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} E_n f_B(E_n)}{\sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} f_B(E_n)} = \frac{\sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} E_n e^{-E_n/kT}}{\sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} e^{-E_n/kT}}, \quad (\text{D1-10})$$

u potpunom skladu s formulom za diskretni raspored ocjena, ali uz drugu funkciju raspodjele. Provedba računa dvostuke sume u gornjem izrazu prvo vodi na zamjenu varijabli - pokratu:  $\alpha = h\nu/kT$ , tako da se dobije

$$\bar{E} = kT \frac{\sum n\alpha e^{-n\alpha}}{\sum e^{-n\alpha}}. \quad (\text{D1-11})$$

Korisni identiteti

$$\frac{d}{d\alpha} (\ln e^{-n\alpha}) = \frac{e^{-n\alpha}(-n)}{e^{-n\alpha}} \quad \text{i} \quad -\alpha \frac{d}{d\alpha} \sum_n (\ln e^{-n\alpha}) = \frac{\sum_n n\alpha e^{-n\alpha}}{\sum_n e^{-n\alpha}} \quad (\text{D1-12})$$

omogućavaju da se gornja formula za srednju vrijednost energije  $\bar{E}$  napiše na sljedeći način:

$$\bar{E} = kT \left( -\alpha \frac{d}{d\alpha} \ln \sum_n e^{-n\alpha} \right) = -h\nu \frac{d}{d\alpha} \ln \sum_n e^{-n\alpha}. \quad (\text{D1-13})$$

Ako uvedemo zamjenu  $y = e^{-\alpha}$ , možemo sumu koja se proteže od nule do  $\infty$  izračunati kao sumu beskonačnog geometrijskog reda

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} = 1 + y + y^2 + y^3 + \dots = \frac{1}{1-y} = \frac{1}{1-e^{-\alpha}} \quad (\text{D1-14})$$

i kada taj rezultat uvrstimo natrag u izraz za  $\bar{E}$ , dobijemo

$$\begin{aligned} \bar{E} &= -h\nu \frac{d}{d\alpha} \ln (1/(1-e^{-\alpha})) = h\nu \frac{1}{1-e^{-\alpha}} (-1) \frac{d}{d\alpha} e^{-\alpha} \\ &= h\nu \frac{e^{-\alpha}}{1-e^{-\alpha}} = \frac{h\nu}{e^{\alpha}-1} \\ &= \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1}. \end{aligned} \quad (\text{D1-15})$$

Gornji izraz predstavlja srednju vrijednost diskretnih energija elektromagnetskog stojnog vala frekvencije  $\nu$ . Taj (cijeli) izraz zamjenjuje faktor  $kT$  u Rayleigh-Jeansovom zakonu pa umjesto formule (D1-23) sada dobivamo formulu (D1-27), odnosno dobili smo Planckovu formulu za spektralnu gustoću zračenja apsolutno crnog tijela.

Planckov zakon (D1-27) daje graf funkcije spektralne gustoće zračenja koji u potpunosti slijedi eksperimentalnu krivulju sa slike D1.2. To (grafičko) slaganje s eksperimentom nužan je uvjet da se Planckov zakon, dan formulom (D1-23) (ali i Planckova relacija, formula (D1-24)) promovira u *zakon* zračenja apsolutno crnog tijela. Bilo je nužno još vidjeti mogu li se iz Planckovog zakona izvesti i drugi zakoni koji su u skladu s eksperimentalnim rezultatima, prije svega Stefan-Boltzmannov zakon (D1-1) i Wienov zakon (D1-3).

Kada se integrira izraz (D1-27) po svim valnim duljinama (vidi primjer niže), dobije se intenzitet zračenja koji je jednak

$$I = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \cdot T^4 \quad (\text{D1-16})$$

i kada se izračuna vrijednost razlomka u gornjoj relaciji, dobit će se točna vrijednost ranije eksperimentalno određene Stefan-Boltzmannove konstante, koju smo ranije naveli, s tim da je Planckova konstanta bila određena nezavisno od gornjeg zakona (vidi primjer).

Nadalje, za velike valne duljine, dakle u području u kojem se Rayleigh-Jeansov zakon i eksperimentalna krivulja poklapaju, iz Planckovog zakona (D1-27) lako možemo dobiti Rayleigh-Jeansov zakon.<sup>†</sup> Naime, za jako veliku valnu duljinu  $\lambda$ , eksponent je malen pa vrijedi

$$e^{hc/\lambda kT} \simeq 1 + \frac{hc}{\lambda kT}. \quad (\text{D1-17})$$

---

<sup>†</sup> Formalno, samo zamijenimo u Planckovom zakonu Planckove faktore s  $kT$ .



Nazivnik je jednak  $hc/\lambda kT$ , što kraćenjem s  $hc/\lambda$  u (D1-27) daje upravo  $kT$ , odnosno Rayleigh-Jeansov zakon.

### Dodatak D1.3

**Izvod Stefan-Boltzmannovog zakona iz Planckovog zakona za spektralnu gustoću zračenja  $f(\lambda, T)$**

Valja upozoriti da se u literaturi rabi često i funkcija  $S(\lambda, T)$  ili  $\rho(\lambda, T)$  koja predstavlja gustoću energije po valnoj duljini, a povezana je s funkcijom  $f(\lambda, T)$  kao:  $f(\lambda, T) = (c/4)S(\lambda, T) = \rho(\lambda, T)$ . Spektralna gustoća zračenja definirana je kao promjena intenziteta po valnoj duljini,  $f(\lambda, T) = dI/d\lambda$ . Stoga je intenzitet zračenja, koji je jednak iznosu Poyntingovog vektora, jednak

$$I = \int_0^{+\infty} f(\lambda, T) d\lambda, \quad (\text{D1-18})$$

a tu su veličinu proučavali Stefan i Boltzmann te formulirali S-B zakon  $I = \sigma T^4$ . Ovdje želimo iz Planckovog zakona izračunati vrijednost konstante  $\sigma$ . Prvo transformiramo funkciju  $f(\lambda, T)$  u funkciju po frekvenciji  $\nu$ :

$$f(\lambda, T) d\lambda = f(\nu, T) d\nu, \quad \text{odakle je, uz } c = \lambda\nu$$

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (\text{D1-19})$$

U integralu za intenzitet zračenja uvedimo novu varijablu  $y = h\nu/kT$  pa ćemo dobiti

$$I = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^{+\infty} \frac{y^3 dy}{e^y - 1}. \quad (\text{D1-20})$$

Time smo u stvari već izveli S-B zakon, jer integral očito ima samo neku numeričku vrijednost te ostaje ovisnost intenziteta o  $T^4$ . Međutim, ovdje želimo račun provesti do kraja. Prvo napišimo integral u općenitijem obliku

$$\mathcal{I}(z) = \int_0^{+\infty} \frac{y^{z-1} dy}{e^y - 1}, \quad (\text{D1-21})$$

(a  $z = 4$  u našem slučaju). Nazivnik možemo nakon množenja razlomka s  $e^{-y}$  shvatiti kao rezultat sumiranja jednog (beskonačnog) geometrijskog reda

$$\begin{aligned} \frac{e^{-y}}{1 - e^{-y}} &= e^{-y} (1 + e^{-y} + e^{-2y} + e^{-3y} + \dots) \\ &= e^{-y} \sum_{n=0}^{n=\infty} e^{-ny} = \sum_{n=0}^{n=\infty} e^{-(n+1)y} \end{aligned} \quad (\text{D1-22})$$

pa gornji integral postaje

$$\mathcal{I}(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \int_0^{+\infty} y^{z-1} e^{-(n+1)y} dy. \quad (\text{D1-23})$$

Uvedimo novu varijablu  $t$ :

$$t = \frac{y}{n+1} \quad dy = (n+1) dt \quad \text{pa dobijemo}$$

$$\mathcal{I}(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(n+1)^z} \int_0^{+\infty} t^{z-1} e^{-t} dt. \quad (\text{D1-24})$$

Prvi član u beskonačnoj sumi je po definiciji *Riemannova zeta-funkcija* koju pišemo ovako:

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} \quad (\text{D1-25})$$

i ona je dana u tablicama funkcija. Ovdje dajemo osnovne formule i u tablici neke njene vrijednosti. Drugi faktor - integral u gornjem izrazu je definicija  $\Gamma$ -funkcije (vidi niže).

Riemannova zeta-funkcija definirana je, dakle, ovako:

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} \quad \text{i vrijedi} \quad \zeta(2n) = \frac{(2\pi)^{2n}}{2(2n)!} |B_{2n}|, \quad (\text{D1-26})$$

gdje su  $B_{2n}$  Bernoullievi brojevi, navedeni u matematičkim tablicama. Vrlo važne formule, (a jednu ćemo ovdje i izvesti) su

$$\begin{aligned} \zeta(s) &= \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{+\infty} \frac{x^{s-1}}{e^x - 1} dx \\ \zeta(s) &= \frac{1}{(1 - 2^{1-s})\Gamma(s)} \int_0^{+\infty} \frac{x^{s-1}}{e^x + 1} dx. \end{aligned} \quad (\text{D1-27})$$

Tablica vrijednosti Riemannove zeta-funkcije  $\zeta(s)$

| $s$        | 2         | 3      | 4          | 5      | 6           | 7      | 8            |
|------------|-----------|--------|------------|--------|-------------|--------|--------------|
| $\zeta(s)$ | $\pi^2/6$ | 1,2021 | $\pi^4/90$ | 1,0369 | $\pi^6/945$ | 1,0083 | $\pi^8/9450$ |

*Gamma*-funkcija za cjelobrojne argumente predstavlja faktorijele:

$$\begin{aligned} \Gamma(s) &= \int_0^{+\infty} t^{s-1} e^{-t} dt \quad \text{i za } z = \text{prirodni broj} \\ \Gamma(z) &= (z-1)! \end{aligned} \quad (\text{D1-28})$$

Prema tome, za naš slučaj ( $z = 4$ ) imamo

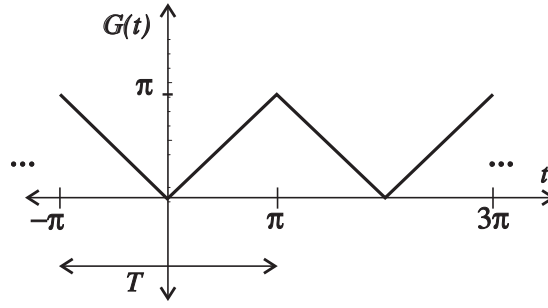
$$\mathcal{I}(4) = \zeta(4)\Gamma(4) = \frac{\pi^4}{90} 3! = \frac{\pi^4}{15}. \quad (\text{D1-29})$$

Račun zeta-funkcije za  $s = 4$  proveden je niže. Taj rezultat odmah daje instenzitet - S-B zakon

$$\begin{aligned} I &= \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 \\ &= \sigma T^4 \quad \text{uz} \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ JK}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}. \end{aligned} \quad (\text{D1-30})$$

#### Dodatak D1.4

##### Račun zeta-funkcije za $s = 4$

Slika DD1.3- Periodička funkcija  $G(t)$ 

Periodička funkcija  $G(t)$  zadana je na intervalu  $[0, 2\pi]$

$$G(t) = \begin{cases} t & \text{za } 0 < t < \pi \\ 2\pi - t & \text{za } \pi < t < 2\pi. \end{cases} \quad (\text{D1-31})$$

Napišimo Fourierov prikaz te funkcije. Pomoću dobivenog rezultata pronađite izraz za sumu beskonačnog reda oblika  $\sum_n 1/n^4$ .

Prema poznatim formulama periodičku funkciju  $G(t) = G(t + T)$ , koja je periodička na intervalu  $[0, T]$ , možemo prikazati (beskonačnim) redom harmoničkih funkcija sinus i cosinus ovako

$$G(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad \text{uz} \quad (\text{D1-32})$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T G(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T G(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{i} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T G(t) \sin(n\omega t) dt.$$

pa računamo koeficijente u Fourierovom razvoju. S obzirom na to da je funkcija  $G(t)$  parna (gledano na intervalu  $[-T/2, T/2] = [-\pi, \pi]$ ), odmah vidimo da će koeficijenti  $b_n$  biti jednaki nuli (zbog integracije neparne funkcije  $G(t) \sin(n\omega t)$  preko simetričnog područja). Sada imamo

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} G(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-t) dt + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} t dt = \pi \quad (\text{D1-33})$$

i slično

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G(t) \cos(nt) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-t) \cos(nt) dt + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} t \cos(nt) dt = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} t \cos(nt) dt. \end{aligned} \quad (\text{D1-34})$$

Gornji integral je elementaran, ali ovdje možemo ilustrirati kako ga izračunati pomoću važne pomoćne metode deriviranja po parametru. Valja uočiti da za funkciju  $I(n, t) = \sin(nt)$  vrijedi

$$I(n, t) = \sin(nt) = \int t \cos(nt) dn, \quad (\text{D1-35})$$

gdje varijablu  $n$  ovdje možemo smatrati kontinuiranom. Dakle, vrijedi

$$\frac{dI(n, t)}{dn} = t \cos(nt) \quad (\text{D1-36})$$

i možemo napisati

$$\begin{aligned}
 \int_0^\pi t \cos(nt) dt &= \int_0^\pi \left[ \frac{dI(n, t)}{dn} \right] dt = \frac{d}{dn} \int_0^\pi I(n, t) dt = \\
 &= \frac{d}{dn} \int_0^\pi \sin(nt) dt = \frac{d}{dn} \left[ -\frac{1}{n} \cos(nt) \right]_0^\pi = \\
 &= \frac{d}{dn} \left[ -\frac{1}{n} \cos(n\pi) + \frac{1}{n} \right] = \frac{1}{n^2} \cos(n\pi) - \frac{1}{n^2},
 \end{aligned} \tag{D1-37}$$

(gdje smo uzeli da je  $\sin(n\pi) = 0$ ). Na taj smo način dobili konačni rezultat koji uvršten u raniji izraz daje

$$a_n = \frac{2}{n^2\pi} [\cos(n\pi) - 1] = \frac{2}{n^2\pi} [(-1)^n - 1], \tag{D1-38}$$

što daje

$$a_n = \begin{cases} -\frac{4}{n^2\pi} & \text{za } n = \text{neparan i} \\ 0 & \text{za } n = \text{paran.} \end{cases} \tag{D1-39}$$

Dakle, razvoj funkcije “pilastog napona”  $G(t)$  dan je ovako

$$G(t) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2} \cos(nt). \tag{D1-40}$$

Zanimljivo je još razmotriti gornju funkciju u intervalu  $0 < t < \pi$ . Tamo je  $G(t)$  jednaka  $t$  pa pišemo

$$t - \frac{\pi}{2} = -\frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2} \cos(nt), \tag{D1-41}$$

a kvadriranjem ćemo dobiti

$$t^2 - \pi t + \frac{\pi^2}{4} = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2} \cos(nt) \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{m^2} \cos(mt). \tag{D1-42}$$

Adicioni teorem za funkciju kosinus daje

$$t^2 - \pi t + \frac{\pi^2}{4} = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2} \frac{1}{m^2} \frac{1}{2} [\cos(n-m)t + \cos(n+m)t]. \tag{D1-43}$$

Ako sada integriramo gornju jednakost u intervalu  $0 \leq t \leq \pi$  na desnoj ćemo strani dobiti integrale tipa

$$\frac{1}{n \pm m} \sin(n \pm m)t \Big|_0^\pi \tag{D1-44}$$

i svi oni su jednaki nuli, osim za slučaj kada je  $n - m = 0$  i  $n + m = 0$ . Ova druga jednakost nije nikad ispunjena (pa su integrali s  $\cos(n+m)t$  svi jednaki nuli), a za  $n - m = 0$  ili  $n = m$  imamo integrale

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1,3,5,\dots} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2} \frac{1}{m^2} \int_0^\pi \cos[(n-m)t] \Big|_{n=m} dt = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^4} \int_0^\pi dt = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^4} \pi. \tag{D1-45}$$

Nakon integracije gornji izraz napišemo ovako:

$$\left[ \frac{t^3}{3} - \frac{\pi t^2}{2} + \frac{\pi^2 t}{4} \right]_0^\pi = \frac{16}{\pi^2} \pi \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^4}, \tag{D1-46}$$

što daje

$$\frac{\pi^4}{96} = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^4}. \quad (\text{D1-47})$$

Desna strana dio je općenitijeg reda  $S_4$

$$\begin{aligned} S_4 &\equiv \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{1}{n^4} = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^4} + \sum_{n=2,4,6,\dots} \frac{1}{n^4} = \\ &= \frac{1}{1^4} + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{5^4} + \dots + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{4^4} + \frac{1}{6^4} + \dots = \\ &= \frac{\pi^4}{96} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{4^4} + \frac{1}{6^4} + \dots = \frac{\pi^4}{96} + \frac{1}{2^4} \left( \frac{1}{1^4} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{3^4} + \dots \right) = \\ &= \frac{\pi^4}{96} + \frac{1}{2^4} S_4, \end{aligned} \quad (\text{D1-48})$$

pa konačno imamo jednakost

$$\begin{aligned} S_4 &\equiv \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{96} + \frac{1}{2^4} S_4 \quad \text{ili} \\ \frac{15}{16} S_4 &= \frac{15}{16} \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{96}, \quad \text{što konačno daje} \end{aligned} \quad (\text{D1-49})$$

$$\sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}.$$

## Dodatak D1.5

### Limes Planckovog zakona za male valne duljine

Za male valne duljine eksponent je vrlo velik pa  $(-1)$  možemo zanemariti u nazivniku, te ćemo dobiti

$$f(\lambda, T) \simeq \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT}. \quad (\text{D1-50})$$

Takvu je formulu

$$f(\lambda, T) = \frac{a}{\lambda^5} e^{-b/kT} \quad (\text{D1-51})$$

ranije uveo W. Wien u pokušaju da opiše funkciju spektralne gustoće zračenja  $f(\lambda, T)$  i iz eksperimentalnih podataka odredio je konstante  $a = 3,7407 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$  i  $b = 1,4386 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ . Taj zakon se dobro slaže s eksperimentalnom krivuljom za male valne duljine, međutim, za velike valne duljine rezultati se za 40% i više razlikuju od eksperimentalnih podataka. Time je Planckov zakon još jednom pokazao svoju univerzalnost.

## Dodatak D1.6

### Wienova konstanta iz Planckovog zakona zračenja

Wienov zakon pomaka možemo dobiti iz Planckovog zakona tako da odredimo valnu duljinu  $\lambda_m$  za koju krivulja spektralne gustoće zračenja ima maksimum. Deriviranjem funkcije  $f(\lambda, T)$  i izjednačavanjem s nulom dobijemo jednadžbu

$$-\frac{10hc^2}{\lambda^6 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} + \frac{2hc^2 e^{hc/\lambda kT}}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)^2} \cdot \frac{hc}{\lambda^2 kT} = 0, \quad (\text{D1-52})$$

ili, ako uvedemo novu varijablu  $x = hc/\lambda kT$ , dobijemo

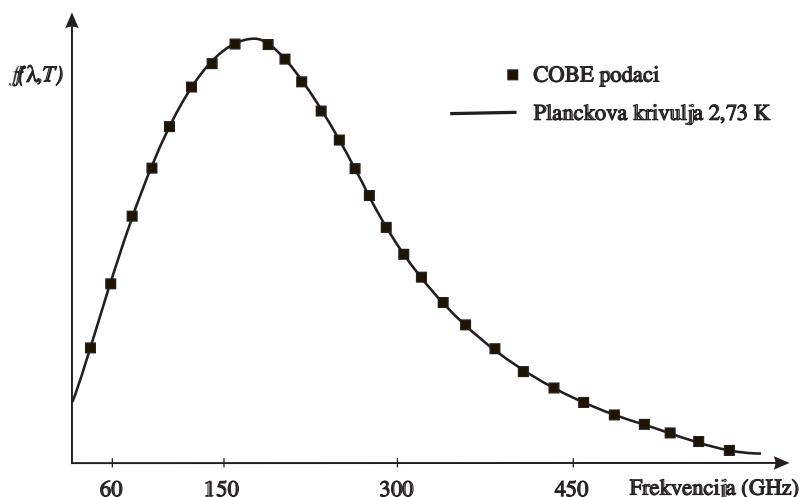
$$\frac{x e^x}{e^x - 1} = 5, \quad (\text{D1-53})$$

koju možemo riješiti samo numerički. Rezultat je  $x_0 = 4,965$  pa iz gornje relacije dobijemo da je

$$\lambda_m = \frac{hc}{4,965 \cdot kT} \quad \text{ili} \quad (\text{D1-54})$$

$$\lambda_m \cdot T = \frac{hc}{4,965 \cdot k} = k_W = 0,2896 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

U vrijeme o kojem govorimo nije se točno znala vrijednost Boltzmannove konstante  $k$ . Ona je povezana s druge dvije prirodne konstante, tj.  $k = R/N_A$ , gdje je  $R$  *univerzalna plinska konstanta* (vidi D4) i čija se vrijednost točno znala, a  $N_A$  je konstanta zvana *Avogadrov broj*, koja nije bila poznata. Prema tome, za određenje konstanti  $h$  i  $k$  iz Stefan-Boltzmannovog zakona (vidi (D1-39)) trebala je još jedna relacija, a nju je dao gornji izraz, dakle Wienova konstanta. Naj taj je način Planck odredio konstantu  $h$ , ali i pronašao je vrijednost naboja elektrona koji je bio povezan s Avogadrovim brojem iz Faradayevih zakona elektrolize.<sup>bb</sup> Planck je dobio vrijednost za naboj elektrona  $e$  koja se razlikuje od današnje vrijednosti za svega 2,3%!



Slika dD1.4- Spektralna gustoća mikrovalnog pozadinskog kozmičkog zračenja: teorijska krivulja i eksperimentalni podatci.

**Pozadinsko mikrovalno kozmičko zračenje** Pozadinsko mikrovalno kozmičko zračenje (*cosmic microwave background radiation* - *CMBR*) je zračenje otkriveno 1965. godine, (a teoretski su ga 1948. godine predskazali Gamow i Alpher) i u vezi s njegovim otkrićem i daljim izučavanjem dodijeljeno je više Nobelovih nagrada. To je zračenje koje prožima cijeli svemir, predviđeno je teorijom velikog praska koja slijedi iz opće teorije relativnosti, a ostatak je elektromagnetskog zračenja (fotona) u svemiru koji se širio i hladio pa spektralna gustoća mikrovalnog pozadinskog zračenja odgovara zračenju apsolutno crnog tijela temperature 2,725 K, s maksimumom na valnoj duljini 1,9 mm. Mjerenja zadnjih godina s instrumentima na satelitu COBE (*Cosmic Background Explorer*) pokazuju da krivulja slijedi Planckovu teorijsku formulu najtočnije od svih mjerenja do sada napravljenih u prirodi (vidi sliku).

<sup>bb</sup> Jean P. Perrin (1870.-1942.) je 1909. godine odredio konstantu  $N_A$  zvanu Avogadrov broj, prema Lorenzu Romanu Amadeu Avogadru (1776.-1856.).

**DODATAK D2 Planckov zakon zračenja crnog tijela iz termodinamike**

Prema glavnom tekstu vidimo da je Planck napravio niz koraka strogo u okviru termodinamike u želji da pronađe funkciju koja slijedi eksperimentalnu krivulju koju mu je priredio njenov prijatelj Rubens. Ovdje ćemo provesti detaljan prikaz postupka koji je doveo do izraza koji danas zovemo Planckova formula zračenja apsolutno crnog tijela, izvedena, kao što nas povijest uči na način koji je to izveo M. Planck, vrstan teoretski fizičar koji je cijeli život posvetio (klasičnoj) termodinamici, a posebno termodinamičkoj funkciji - entropiji.

On je, dakle, krenuo od prvog zakona termodinamike

$$dU = d'Q - d'W + \mu dN = d'Q - p dV + \mu dN \quad (\text{D2-55})$$

koji, uz stalan broj čestica i sustav nepromjenljivog volumena daje vezu unutarnje energije  $U$  i topline

$$dU = d'Q. \quad (\text{D2-56})$$

Crta na diferencijalima signaliziraju da infinitezimalne promjene odgovarajuće veličine ovise o načinu kako se od početnog dolazi do konačnog stanja (ili, matematički,  $d'Q$  nije totalni diferencijal). Primjerice, dovodenje topline ( $d'Q$ ) različito se odražava na sustav (idealni plin) ovisno o tome da li se toplina dovodi izovolumno ili izobarno, a to izražavamo specifičnim ili molnim toplinskim kapacitetima ( $c_p, c_v, C_p, C_v$ ) čija je razlika dana Mayerovom relacijom. Međutim, uvodi se entropija  $S$  koja je definirana ovako

$$dS = \frac{d'Q}{T} \quad (\text{D2-57})$$

pa dobijemo

$$dU = T dS \quad \text{ili} \quad dS = \frac{1}{T} dU. \quad (\text{D2-58})$$

Ako se na čas vratimo na općenitiji slučaj  $S = S(U, V)$ , tada možemo za totalni diferencijal funkcije dvije varijable napisati

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_V dU + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_U dV \quad (\text{D2-59})$$

i uspoređujući tu jednakost s ranijom vidimo da je

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}, \quad (\text{D2-60})$$

za izovolumni proces. Uz Rayleigh-Jeansov zakon (vidjeti dodatak D1) za koji se zna da je vodio do ultraviolettne katastrofe, tj. intenzitet je za male vrijednosti valne duljine postajao beskonačan, M. Planck je imao na raspoloaganju Wienovu formulu spektralne raspodjele koju je Wien matematički “složio” da bi je prilagodio eksperimentalnim podatcima koje su “proizvodili” vrsni eksperimentalni fizičari onog doba poput O. Lummera, F. Kurlbauma, E. Pringsheima i H. Rubensa. Wien je, dakle, napisao formulu

$$U(\lambda, T) = \frac{\alpha}{\lambda^5} e^{-\beta/kT} \quad \text{ili} \quad (\text{D2-61})$$

$$U(\nu, T) = a \nu e^{-b\nu/T},$$

gdje su  $(\alpha, \beta, a, b)$  konstante koje valja odrediti iz eksperimenata, a  $\nu$  i  $\lambda$  su frekvencija i valna duljina zračenja vezani relacijom  $c = \lambda\nu$ . Ujedno je ukupni intenzitet jednak

$$I = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty f(\nu, T) d\nu, \quad (\text{D2-62})$$

gdje je uvedena spektralna gustoća zračenja

$$\begin{aligned} f(\lambda, T) &= \frac{dI}{d\lambda} = I_\lambda \quad \text{ili} \\ f(\nu, T) &= \frac{dI}{d\nu} = I_\nu, \end{aligned} \quad (\text{D2-63})$$

a njihova veza je dana ovako

$$\begin{aligned} f(\lambda, T) d\lambda &= f(\nu, T) d\nu \quad \text{uz} \\ d\lambda &= -\frac{c}{\nu^2} d\nu. \end{aligned} \quad (\text{D2-64})$$

Wienove formule dobile su čak i naziv *Wienova distribucija* iako one nisu izvedene iz “prvih principa” već su izvedene matematičkim prosuđivanjem i prilagođavanjem. Jer, doista, Wienova je formula dobro slijedila podatke u području gdje je sasvim zakazao Rayleigh-Jeansov zakon, ali je “promašivala” podatke u području gdje je Rayleigh-Jeansov zakon dobro radio. Također, Rayleigh-Jeansov zakon je bio izveden od vrsnih fizičara iz stroge klasične mehanike, termodinamike i elektrodinamike.

Max Planck je uočio da se iz 1. zakona termodinamike pisanog za izovolumni proces i empirijskog izraza za “promjenu-promjene-entropije” s energijom napisanog ovako

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U} \quad (\text{D2-65})$$

može “izvesti” Wienova formula ovako

$$\begin{aligned} \frac{d}{dU} \left( \frac{dS}{dU} \right) &= -\frac{\alpha}{U} \quad \text{i} \\ -\frac{dS}{dU} &= \int \frac{\alpha}{U} dU = \alpha(\ln U + \ln C) \quad \text{tj.} \\ \frac{dS}{dU} &= -\alpha \ln(\gamma U) = \frac{1}{T} \quad \text{pa je} \\ \gamma U &= e^{-1/\alpha T} \quad \text{i} \\ U &= \frac{1}{\gamma} e^{-1/\alpha T} = a\nu e^{-b\nu/T}. \end{aligned} \quad (\text{D2-66})$$

uz zamjenu konstanti  $(\alpha, \beta) \rightarrow (a, b)$  i pri tome vodeći računa da je prema Wienovom “zakonu” unutarnja energija proporcionalna frekvenciji  $U \propto \nu$ .

Uz te oznake vratimo se na entropiju

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dU} &= \frac{1}{T} = -\frac{1}{b \nu} \ln \left( \frac{U}{a\nu} \right) \quad \text{pa je} \\ dS &= -\frac{1}{b\nu} \ln \left( \frac{U}{a\nu} \right) dU \end{aligned} \quad (\text{D2-67})$$

i uz  $U/(a\nu) = y$  dobijemo da je

$$S = -\frac{1}{b\nu} \int \ln y \cdot a\nu dy \quad (\text{D2-68})$$

te uz 3. zakon termodinamike  $S(0) = 0$  imamo

$$S = -\frac{U}{b\nu} \left[ \ln \left( \frac{U}{a\nu} - 1 \right) \right]. \quad (\text{D2-69})$$

Tako je M. Planck izračunao entropiju iz 1. zakona termodinamike i Wienove empirijske formule. Međutim, 1900. godine do Plancka su došli podatci (koje mu je donosio njegov prijatelj Heinrich Rubens) da Wienova formula ne radi dobro u području velikih valnih duljina (ili u Rayleigh-Jeansovom “režimu”)



i ta su odstupanja reda veličine 40-50%. Kombiniranjem matematičkih ovisnosti promjene-promjene entropije s energijom, Planck je vidio da je dobro ponašanje u tom području moguće dobiti iz izraza

$$\frac{d^2 S}{dU^2} \sim \frac{1}{U^2}. \quad (\text{D2-70})$$

Međutim, za područje UV-katastrofe izvedena linearna ovisnost je dobro radila pa je Planck jednostavno pokušao “interpolacijsku formulu” koja uključuje u istom izrazu i jedno i drugo područje  $1/U$  i  $1/U^2$ . Tako je napisao

$$\begin{aligned} \frac{d}{dU} \left( \frac{dS}{dU} \right) &= \frac{-A}{U(B+U)} \quad \text{ili} \\ d \left( \frac{1}{T} \right) &= -\frac{A}{U(B+U)} dU. \end{aligned} \quad (\text{D2-71})$$

Rastavljanjem na parcijalne razlomke dobiju se dva integrala

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= -\frac{A}{B} \left[ \int \frac{dU}{U} - \int \frac{dU}{B+U} \right] \quad \text{što daje} \\ \frac{1}{T} &= -\frac{A}{B} \ln \frac{U}{B+U} \end{aligned} \quad (\text{D2-72})$$

odakle je

$$\begin{aligned} U &= B e^{-B/AT} + U e^{-B/AT} \quad \text{ili} \\ U &= \frac{B}{e^{B/AT} - 1}. \end{aligned}$$

To je rezultat koji je M. Planck dobio, prema vlastitim sjećanjima, nakon više tjedana grozničavog računanja. Iz njega se može dobiti gustoća energije dana ovako

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^2} \cdot U = \frac{8\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{B}{e^{B/AT} - 1}, \quad (\text{D2-73})$$

a spektralna gustoća zračenja je

$$f(\nu, T) = \frac{c}{4} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} U, \quad (\text{D2-74})$$

pri čemu je iz Rayleigh-Jeansovog zakona doprinos  $U = kT$  koji dolazi iz teorema o ekviparticipiji energije, zamijenjen gornjim upravo izvedenim izrazom za  $U$  za koji se zna da je, prema Wienovom zakonu proporcionalan frekvenciji  $U \propto \nu$ , tj.

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/AT} - 1}, \quad (\text{D2-75})$$

gdje smo umjesto konstante  $B$  uveli oznaku  $\epsilon$  za energiju proporcionalnu frekvenciji  $\nu$ . Taj je rezultat koji izveo Planck iz “pogođenog” Wienovog zakona (formule) i egzaktnog klasičnog izvoda Rayleigh-Jeansove formule bio u savršenom skladu s eksperimentalnim rezultatima. Međutim, Planck se nije mogao zadovoljiti tim rezultatom, odnosno, on je želio imati jasnu teoretsku podlogu za njega. Tako se okrenuo Boltzmanovu radu u kojem je Boltzmann povezivao Plancku dragu entropiju i vjerojatnost. On je uveo jednakost

$$S = k \ln W \quad (\text{D2-76})$$

gdje je  $k$  (danas zvana) Boltzmannova konstanta (koju je uveo u stvari Planck),  $S$  je entropija a  $W$  je vjerojatnost rasporeda energija po energijskim stanjima. Ta formula slijedi princip aditivnosti entropije i multiplikativnosti vjerojatnosti. Planck je preuzeo od Boltzmannova pojam *kompleksiona* kao raspodjele diskretnih elemenata koji nose energiju po diskretnim energijskim stanjima, pri čemu se ni elementi ni

stanja međusobno ne razlikuju. Izraz koji je izveo Boltzmann iz kombinatorike (a kasnije i Ehrenfest i Kammerlingh Onnes [E1915]) izgleda ovako

$$W = \frac{(N - P - 1)!}{N!(P - 1)!} \quad (\text{D2-77})$$

gdje  $P$  odgovara energiji koju, prema Planckovoj slici izotermne šupljine koja predstavlja apsolutno crno tijelo, zrače oscilatori - Hertzovi dipoli koji harmonički titraju s prigušenjem (zbog zračenja) i pod prisilom vanjskog promjenljivog elektromagnetskog polja prema općoj jednadžbi prigušenog titranja s vremenski ovisnom prisilom

$$a\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi = d(t). \quad (\text{D2-78})$$

Ta se energija raspodjeljuje na  $N$  spremnika (energijskih razina), a svaka takva raspodjela predstavlja kompleksion (uveden od Boltzmann), tako da je, primjerice za  $P = 4$  energijska doprinosa oscilatora (rezonatora kako ih Planck zove) i za  $N = 2$  oscilatora

$$W_2 = \frac{(2 - 1 + 4)!}{1!4!} = 5. \quad (\text{D2-79})$$

U gornjoj se formuli u nazivniku javljaju  $N!$  i  $(P - 1)!$  jer se ukupan broj kompleksija mora podijeliti zbog nerazlikovanja: niti energijski elementi niti energijske razine međusobno se ne razlikuju. Oscilatori su u toplinskoj ravnoteži pa je Planck prepostavio da svi zrače iste količine energije, a da bi mogao primijeniti gornju formulu za vjerojatnost on je uveo zajedničku ukupnu energiju  $U_N$  koja sadrži  $N$  istih doprinosa od pojedinog oscilatora, tj.

$$U_N = N\epsilon \quad \text{ i } \quad U_N = P\delta \quad (\text{D2-80})$$

što dijeljenjem daje

$$P = N \frac{\epsilon}{\delta} \quad \text{ uz } \quad S_N = NS. \quad (\text{D2-81})$$

Sada gornje oznake uvrstimo u izraz koji veže entropiju i vjerojatnost raspodjele, tj.

$$\frac{S_N}{k} = \ln(N + P - 1)! - \ln(N - 1)! - \ln P!. \quad (\text{D2-82})$$

Za račun (prirodnog) logaritma od faktorijela možemo rabiti Stirlingovu formulu koja vrlo dobro aproksimira faktorije za velike brojeve

$$\begin{aligned} N! &\simeq N^N e^{-N} \quad \text{ pa je} \\ \ln N! &\simeq N \ln N - N. \end{aligned}$$

Nadalje, s obzirom da su i  $N$  i  $P$  veliki brojevi, tada broj 1 u brojniku i u nazivniku možemo zanemariti pa imamo

$$\frac{S_N}{k} = (N + P) \ln(N + P) - N \ln N - P \ln P \quad (\text{D2-83})$$

i uz izraz  $P = N\epsilon/\delta$  imamo

$$\begin{aligned} \frac{S_N}{k} &= N \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) + \ln \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) - \ln N - \frac{\epsilon}{\delta} \left( \ln N + \ln \frac{\epsilon}{\delta} \right) \right] \\ &= N \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) \ln \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) - \frac{\epsilon}{\delta} \ln \frac{\epsilon}{\delta} \right] \end{aligned} \quad (\text{D2-84})$$

i zbog aditivnosti entropije je  $S_N = NS$  pa je

$$S = k \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) \ln \left(1 + \frac{\epsilon}{\delta}\right) - \frac{\epsilon}{\delta} \ln \frac{\epsilon}{\delta} \right]. \quad (\text{D2-85})$$

Taj izraz za entropiju valja usporediti (nakon deriviranja) s ranijim izrazom - interpolacijskom formulom. Dakle

$$\begin{aligned}\frac{dS}{d\epsilon} &= k \left[ \frac{1}{\delta} \ln \left( 1 - \frac{\epsilon}{\delta} \right) - \frac{1}{\delta} \ln \frac{\epsilon}{\delta} \right] \quad \text{i} \\ \frac{d^2S}{d\epsilon^2} &= k \frac{1}{\delta^2} \left( \frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{\delta}} - \frac{\delta}{\epsilon} \right)\end{aligned}\tag{D2-86}$$

i to postaje

$$\frac{d^2S}{d\epsilon^2} = \frac{-k}{\epsilon(\epsilon + \delta)} \quad \leftrightarrow \quad \frac{-A}{U(B + U)}.\tag{D2-87}$$

Dakle, razmatrajući raspodjelu energija po oscilatorima Planck je reproducirao “interpolacijsku formulu” u kojoj smo imali  $A = k$  i  $B = \delta$ .

Pogled na spektralnu gustoću zračenja uz podsjećanje na Wienovu formulu gdje je  $U \propto \nu$  daje

$$\begin{aligned}f(\nu, T) &= \frac{c}{4} \frac{8\pi\nu^2}{c^2} U \\ &= \frac{2\pi\nu^2}{c} \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1}\end{aligned}\tag{D2-88}$$

a ako napišemo da je  $\epsilon = h\nu$  gdje je  $h$  “neka nepoznata konstanta” (u trenutku stvaranje te formule) tada imamo

$$\begin{aligned}U &= \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{hc}{\lambda} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{ili} \\ f(\nu, T) &= \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{ili} \quad f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.\end{aligned}\tag{D2-89}$$

Te formule u potpunosti slijede eksperimentalne podatke i iz njih se mogu izvesti ostali zakoni zračenja (prema dodatku D1). Postigli smo prema tome naš cilj da iz tehnološki bliske teorije fizike, jedne od 5GTF, dobijemo formulu koja konceptualno predstavlja početak kvantne teorije, bez obzira što u trenutku njenog stvaranja ni sam Planck nije vjerovao da je napravio, u suprotnosti sa svojim klasičnim uvjerenjem, korak prema kvantizaciji energije, a prema tome i korak prema “pravoj” kvantnoj mehanici.

**Literatura i reference**

- [A1976] N.W. Ashcroft i N.D. Mermin: *Solid State Physics*, Saunders College Publishing, Forth Worth (1976);
- [A2004] E.S. Abers: *Quantum Mechanics*, Pearspon Education, Upper Saddle River (2004).
- [D1960] R.H. Dicke, J.P. Wittke: *Introduction to Quantum Mechanics*, Addison Wesley Publ. Comp., Reading (1960);
- [E1915] P. Ehrenfest i H. Kamerlingh Onnes, *Simplified deduction of the formula from the theory of combinations which Planck uses as the basis of his radiation theory*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 29:170, 297-301.
- [K1978] T.S. Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford University Press, New York (1978).
- [K2020] V. Kasirajan: *Fundamentals of Quantum Computing*, Springer, Cham (2020);
- [M1991] P.W. Milonni i M.-L. Shih, *Zero-point energy in early quantum theory*, Am. J. Phys. **59**, 684 (1991).
- [M2007] N.D. Mermin: *Quantum Computer Science: An Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge (2007);
- [N1991] M. Nauenberg, *Max Planck and the birth of tje quantum hypothesis*, Am. J. Phys. **84**, 709 (1991).
- [N2000] M.A. Nielsen i I.L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, Cambridge (2000);
- [R2007] M.S. Rogalski i S. B. Palmer: *Quantum Physics*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam (1999);
- [S1985] J.J. Sakurai: *Modern Quantum Mechanics*, Addisoon Wesley Publ. Company, Reading (1985);
- [W2015] S. Weinberg: *To Explain the World - The Discovery of Modern Science*, Penguin Books, Random House (2015);
- [W2018] S. Weinberg: *Third Thoughts*, Belknap Press, London (2018);
- [W2022] S. Weinberg: *Lectures on Quantum Mechanics*, 2. izdanje, Cambridge University Press, Cambridge (2022);
- [Y2008] N.S. Yanofsky i M.A. Mannucci: *Quantum Computing for Computer Scientists*, Cambridge University Press, Cambridge (2008);

## POVIJEST I FILOZOFIJA TEHNIKE

ZAGREB, FER, 14. i 15. LIPNJA 2023.

*Prof. dr. sc. Slavko Vujević*  
Sveučilište u Splitu, FESB  
R. Boškovića 32, Split  
[vujevic@fesb.hr](mailto:vujevic@fesb.hr)

**ISTINE I ZABLUDE O POČECIMA RAZVOJA  
ELEKTRIFIKACIJE U EUROPI I SJEVERNOJ AMERICI**

**Sažetak:** U radu je opisan sam početak razvoja elektrifikacije u Europi i Sjevernoj Americi. Opću elektrifikaciju svijeta omogućili su mnogi znani i neznani izumitelji, tehničari, inženjeri i znanstvenici. Rijetko postoji samo jedan izumitelj bilo kojeg tehničkog izuma. Opća je elektrifikacija nastupila tek krajem 19. stoljeća kada su razvijeni trofazni AC prijenosni sustavi, a do tog se sustava došlo preko DC sustava i jednofaznog AC prijenosnog sustava. To je bio veliki pothvat za koji su nesumnjivo bili zaslužni izumitelji, ali još su više bili zaslužni financijeri i industrijalci koji su osnovali prve elektrotvrtke. Međutim, ne treba zaboraviti ni važnu ulogu tvrtki koje su financirale izgradnju jednofaznih, dvofaznih i trofaznih AC elektrana i AC prijenosnih sustava, prvenstveno radi električnog napajanja svojih tvornica. Dvofazni AC prijenosni sustavi bili su samo loš pokušaj da se iznađe optimalan višefazni AC prijenosni sustav. Ma koliko se to činilo čudnim, o počecima elektrifikacije premalo se zna i postoji mnoštvo zablude o tome, a među njima se ističe zablada da je Nikola Tesla bio jedini izumitelj izmjenične struje i glavni tvorac opće elektrifikacije. Sveprisutna je i zablada da je HE Krka (Jaruga 1) bila dvofazna AC elektrana iako je ona bila jednofazna AC elektrana. Mnogi su uvjereni da je Adamsova hidroelektrana sagrađena na slapovima Niagare bila trofazna AC elektrana iako je ona bila dvofazna AC elektrana.

**Ključne riječi:** Europa, Sjeverna Amerika, počeci razvoja, elektrifikacija, trofazni AC prijenosni sustav

## Uvod

Moje ozbiljno zanimanje za povijest elektrifikacije započelo je prije petnaestak godina jer sam svojim studentima na kolegiju Osnove elektroenergetike želio nešto reći o tome, a ja od svojih profesora, nažalost, nisam gotovo ništa o tom čuo. Krenuo sam izučavati ovu problematiku s preduvjerenjem da je sve, ili gotovo sve, vezano za početke elektrifikacije izmislio američki izumitelj Nikola Tesla. Međutim, kad sam proučio mnoštvo knjiga, članaka i patenata iz tog područja, otkrio sam da su mnogi izumitelji značajno doprinijeli elektrifikaciji svijeta, odnosno razvoju trofaznih izmjeničnih prijenosnih sustava, generatora i motora. Tesla je nedvojbeno bio jedan od njih, ali samo jedan od njih. Sve sam činjenice navedene u članku pomno provjerio koristeći više izvora, koje sam i naveo u ovom članku.

## 1. O izumima i izumiteljima

Određuju li povijest pojedinci ili pak zajedničko djelovanje više ljudi? U mnogim slučajevima pojedinci doista značajno utječu na tijek povijesti. Međutim, rijetko postoji samo jedan izumitelj bilo kojeg tehničkog izuma. Na primjer o izumu telefona, koji je pripisan Alexanderu Grahamu Bellu, bilo je puno prijevora i sudskih sporova. Povijest izuma telefona uključuje desetke živopisnih povijesnih osoba i više od 600 zasebnih sudskih sporova.<sup>1</sup> Ni braća Orville i Wilbur Wright nisu bili prvi koji su izmislili, ili čak uspješno upravljali eksperimentalnim zrakoplovom s posadom, a oni se smatraju izumiteljima zrakoplova.<sup>2</sup> Vrlo je ilustrativna i priča o tome kako je američki izumitelj Nikola Tesla, nakon svoje smrti, u lipnju 1943. godine postao izumitelj radija nakon presude Vrhovnog suda SAD-a u sudskom sporu u kojem on nije bio ni tuženik ni tužitelj.<sup>3</sup>

Američki je književnik Mark Twain, prijatelj Nikole Tesle, 1903. godine u pismu Helen Keller napisao: „Potrebno je tisuću ljudi da se izmisli telegraf, ili parni stroj, ili fonograf, ili telefon ili bilo koja druga važna stvar - a posljednji među njima dobiva zasluge, a mi zaboravljamo ostale; dodao je svoju malu mrvicu - to je sve što je učinio. Ove bi nas pouke trebale naučiti da je devedeset i devet posto dijelova svih stvari koje proizlaze iz intelekta plagijat, čisti i jednostavni; a to bi nas trebalo učiniti skromnima. Međutim, po tom se pitanju

---

<sup>1</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 149-153.

<sup>2</sup> Isto, str. 159-160.

<sup>3</sup> Isto, str. 11-16.

ništa ne može učiniti.”<sup>4</sup> Naravno, ni izumi istosmjernog (DC) i izmjeničnog (AC) motora, DC i AC generatora, AC prijenosnog sustava i transformatora nisu djelo samo jednog izumitelja.

Elektroinženjer i sveučilišni profesor Bernard Arthur Behrend je u časopisu *Electrical World and Engineer* 1905. godine napisao: „Velike ideje rijetko su isključivo postignuće pojedinaca. Povijest ljudske domišljatosti jasno pokazuje da se nove ideje rađaju u određenim generacijama istovremeno u glavama nekih od najtalentiranijih ljudi ... tako je bilo i s idejama i izumima koji čine temelj višefaznog AC sustava.”<sup>5</sup>

U našoj i svjetskoj javnosti mnogi obični građani, kao i inženjeri i znanstvenici iz polja elektrotehnike, koji ne znaju činjenice iz povijesti elektrifikacije, smatraju da je izmjeničnu struju i sve što je povezano s elektrifikacijom svijeta izumio Nikola Tesla, američki izumitelj rođen na području današnje Republike Hrvatske. Zahvaljujući medijima stvoren je mitski lik Nikole Tesle, koji se značajno razlikuje od stvarnog lika Nikole Tesle. Tome je značajno doprinijela njegova medijska slava, kao i njegova autobiografija koja je prvi put u SAD-u objavljena 1919. godine. Izvorni tekst i prijevod njegove autobiografije na hrvatski jezik objavila je zagrebačka Školska knjiga 1990. godine.<sup>6</sup> Njegovoj medijskoj slavi najviše su doprinijela njegova predavanja: u svibnju 1888. godine u elektrotehničkoj udruzi AIEE (American Institute of Electrical Engineers), na koledžu Columbia (sada sveučilištu) 1891. godine, u Londonu i Parizu 1892. godine, te u Philadelphiji, St. Louisu i na Svjetskoj kolumbovskoj izložbi u Chicagu 1893. godine. U veljači 1893. godine, kada je sudjelovao na konvenciji National Electric Light Associationa u St. Louisu, Tesla je nizom dobro osmišljenih demonstracija postigao gotovo kulturni medijski status. Držeći predavanje pred više od četiri tisuće ljudi, Tesla je prvi put izveo neke od svojih elektrotehničkih pokusa po kojima će postati poznat. Bežično je napajao fluorescentne cijevi i vitlao njima pred zapanjenom gomilom kao da su svjetleće sablje. Od energetske krize ranih 70-ih godina prošlog stoljeća, američka ga je kontrakultura prigrllila kao usamljenog junaka koji se bori protiv moćnika poput izumitelja Thomasa Alve Edisona i američkog financijera i bankara J. P. Morgana. Prava vjestern priča. Više o istini i mitovima o Nikoli Tesli možete pročitati u već citiranoj Cooperovoj knjizi, objavljenoj 2015. godine.<sup>7</sup> Mala je vjerojatnost da bi Nikola Tesla stekao toliki svjetski mitski status da nije prodao patentna prava za svoje najvažnije izume moćnom industrijalcu Georgeu Westinghouseu, koji je ta patentna prava na sudu beskrupulozno branio,

---

<sup>4</sup> Isto, str. 10.

<sup>5</sup> Isto, str. 86.

<sup>6</sup> N. Tesla, *Moji pronalasci – My Inventions*, 1990.

<sup>7</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015.

prvenstveno radi svog profita.

Mit o usamljenom geniju uvelike je ovjekovječen nedavnim povijesnim redizajnom Nikole Tesle, izumitelja koji je, kažu nam, izumio sve, od radara do mikrovalne pećnice, ali čija ga je velikodušnost i epska bitka sa zlim Thomasom Edisonom osiromašila, osudila na druženje s golubovima i bacila u povijesnu zavjetrinu. Postalo je pomalo pitanje prestiža svrstavanje Tesle među progonjene genijalce koji su, jednostavno, bili ispred svog vremena. Taj je fanatizam u veličanju Tesle posljednjih godina dosegao svoj vrhunac (metaforički, ako ne i zapravo) kroz električni automobil nazvan po Tesli, bezbroj dokumentarnih filmova, mnoge objave na blogovima te velikim naporima da se izgradi muzej na imanju na Long Islandu, odakle je izumitelj pokušao prenijeti besplatnu bežičnu energiju diljem svijeta. To se odražava i u novijim biografijama koje su Teslu proglasile „čarobnjakom“<sup>8</sup>, „gospodarom munja“<sup>9</sup>, „čovjekom koji je izumio dvadeseto stoljeće“<sup>10</sup> i „izumiteljem električnog doba“<sup>11</sup>. Nesvjesno ili namjerno, mnogi Teslini biografi sve zasnivaju na patentima, često zaboravljajući da patentno pravo, osobito u SAD-u, vrlo često nerealno sagledava nastanak izuma. Izum je rijetko niz diskretnih ideja, domišljenih u osami. Umjesto toga, to je postupni proces koji uključuje bljeskove uma, čiji značaj može biti neprepoznat ili pogrešno protumačen, čak i od onih koji su te bljeskove imali.<sup>12</sup>

Stvarni Nikola Tesla nije bio znanstvenik jer se nije služio znanstvenim metodama. Bio je strastveni veliki izumitelj, ali i veliki čudak. U Austriji je 1875. godine započeo četverogodišnji studij strojarstva na Tehničkoj visokoj školi u Grazu, koja je bila poznata po kurikulumu građevinarstva, a na toj visokoškolskoj ustanovi nije bilo studija elektrotehnike. Većina onoga što je Tesla na tom studiju naučio o elektrotehnici potječe sa satova fizike profesora Jacoba Pöschla.<sup>13</sup> Kad mu je tijekom studija ponestalo novca, Tesla se pokušavao uzdržavati kockanjem, uglavnom biljarom i kartanjem. Studij je prekinuo krajem 1878. godine i potiho iz Graza otišao u Maribor, a tamo je uhapšen zbog skitnje i deportiran u Hrvatsku. Iako je Tesla tvrdio da je dvije godine proveo u glavnom gradu Češke dovršavajući studij, češka vlada ne može pronaći dokumente o tome da je Tesla službeno bio upisan na bilo koje od visokih učilišta u Pragu, u razdoblju za koje Tesla tvrdi da je ondje boravio. Kad su Teslini ujaci, koji su financirali Teslino studiranje u Pragu, postali sumnjičavi i prestali ga financirati, Tesla se u siječnju

---

<sup>8</sup> M. J. Seifer, *Wizard – The Life and Times of Nikola Tesla, Biography of a Genius*, 1998.

<sup>9</sup> M. Cheney, R. Uth, *Tesla – Master of Lightning*, 2001.

<sup>10</sup> R. Lomas, *The Man Who Invented the Twentieth Century – Nikola Tesla, Forgotten Genius of Electricity*, 1999.

<sup>11</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014.

<sup>12</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 19.

<sup>13</sup> Isto, str. 25.



1881. godine preselio u Budimpeštu.<sup>14</sup> Dakle, nema službenih podataka da je Tesla ikad završio započeti studij. U Grazu je Tesla saznao za teoriju elektromagnetske indukcije, ali je tek u Francuskoj radeći za Edisona stekao prvo praktično obrazovanje iz elektrotehnike, gdje je od jeseni 1882. godine radio za jednu od triju francuskih podružnica Edisonove tvrtke. Čini se da je Tesla prvotno radio za tvrtku Société Electrique Edison. Tek je radeći u Edisonovim pogonima u pariškom predgrađu Ivryju, Tesla stekao prvo veliko praktično znanje o generatorima i motorima. Sve dotad bavio se „mentalnim inženjerstvom“, odnosno razmišljanjem o tome kako riješiti neke inženjerske probleme.<sup>15</sup> Za većinu Teslinih biografa njegova je veličina utemeljena na Westinghouseovoj pobjedi u sudskim sporovima o pravu prvenstva Teslinih patenata. Ironično je to da ti povjesničari ismijavaju patentni sustav kada se on ne uklapa u jednostavan mit o usamljenom geniju. Kad Tesla izgubi patentnu bitku, to je zato što su interesi moćnika osujetili pravni sustav, barem na neko vrijeme. Međutim, ako interesi moćnika mogu spriječiti sudove da prepoznaju Teslin genij, ne mogu li, također, ti isti moćnici prisiliti sudove da lažno presude u Teslinu korist? Povijest pišu pobjednici (patentnih sporova), a to vrijedi i za Nikolu Teslu.<sup>16</sup>

Nije Tesla bio samo čudak – neki su njegovi životni i stručni stavovi bili potpuno neprihvatljivi. Zagovarao je eugeniku čije je osnovno načelo poticanje rađanja djece samo od zdravih i u svakom pogledu dobro razvijenih parova.<sup>17</sup> Strahovao je od ravnopravnosti žena i muškaraca. Nije vjerovao u postojanje elektromagnetskih polja, ni u teoriju relativnosti, već u postojanje nepostojećeg etera. Nije vjerovao u kvantnu mehaniku. Pogrešno je vjerovao u mogućnost isplativog bežičnog prijenosa električne energije, što ga je, u konačnici, osiromašilo. U svojoj autobiografiji pisao je o sebi kao o nadnaravnoj osobi. Njegovi su biografi njegova pretjerivanja i izmišljotine izrečene u autobiografiji isticali kao dokaz njegove veličine i izuzetnosti, a nisu to shvatili kao pokazatelj da je on osoba sklona pretjerivanju, odnosno osoba kojoj se ne može bezrezervno vjerovati. U svojoj autobiografiji Tesla navodi da su njegovoj majci, čak i nakon šezdesete, prsti bili toliko spretni da je mogla zavezati tri čvora na trepavici.<sup>18</sup> Tko u to može povjerovati? Osim toga Tesla u autobiografiji navodi da je 1899. godine, kad je već prešao četrdesetu godinu, u vrijeme eksperimenata u Coloradu, mogao čuti grmljavinu udaljenu 550 milja (885 kilometara), jer je njegov sluh bio 13 puta osjetljiviji od sluha njegovih mladih suradnika. Osim toga, Tesla tvrdi da je u to vrijeme bio takoreći gluh u usporedbi s osjetljivošću svog sluha u

---

<sup>14</sup> Isto, str. 28.

<sup>15</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014., str. 74.

<sup>16</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 19.

<sup>17</sup> N. Tesla, *A Machine to End War*, 1935., str. 6.

<sup>18</sup> N. Tesla, *Moji pronalasci – My Inventions*, 1990., str. 12.

razdobljima živčane napetosti.<sup>19</sup> U ove Tesline tvrdnje nije lako povjerovati. To znači da je mogao u Splitu čuti grmljavinu koja se dogodila u francuskom gradu Strasbourgu, udaljenom oko 885 kilometara od Splita, a poznato je da intenzitet zvuka opada s kvadratom udaljenosti od izvora i treba mu više od 43 minute da prevale tu udaljenost između Strasbourga i Splita. Najveća udaljenost od mjesta udara munje na kojoj se može čuti grmljavina ne iznosi više od 25 kilometara<sup>20</sup>, a praktična udaljenost na kojoj se može grmljavina čuti iznosi oko 15 kilometara<sup>21</sup>. To znači da je Tesla tvrdio da je njegov sluh, čak i u stanju „gluhoće“, bio najmanje 35 do 59 puta osjetljiviji od sluha „normalnog“ čovjeka, a ne „samo“ 13 puta, kao što je Tesla tvrdio.

Čak je i obiteljska legenda o Teslinom rođenju obavijena svojevrsnim misterijem i dramom koja se lijepo uklapa u suštinski američki mit o usamljenom junaku koji se suočava s velikim preprekama i svladava ih. Tesla je rođen, prema legendi, 1856. godine u ponoć između 9. i 10. srpnja. Dok je snažna oluja bješnjela, a mali se Nikola borio za izlazak iz maternice, uplašena je babica rekla da će novorođenče biti „*dijete oluje*“, na što je Teslina majka odgovorila: „*Ne ... svijetlosti!*“<sup>22</sup> Jedan od najvažnijih Teslinih izuma jest izum asinkronog motora, ali je vrlo upitna istinitost Tesline tvrdnje navedene u njegovoj autobiografiji da je 1882. godine prije odlaska u Pariz, tijekom šetnje budimpeštanskim gradskim parkom s prijateljem Anitalom Szigetijem, otkrio kako stvoriti okretno magnetsko polje, potaknut recitiranjem Goetheova Fausta.<sup>23</sup> To možebitno iznenadno otkriće nikad nije korišteno kao dokaz tijekom sudskih sporova za prvenstvo izuma asinkronog AC motora. Tesla u autobiografiji iz 1919. godine prepričava scenu u budimpeštanskom parku, ali tijekom svog svjedočenja o prvenstvu patenta 1903. godine, Tesla je tvrdio da je u Parizu negdje oko 1883. godine nacrtao svoje dijagrame na zemlji, objašnjavajući svoju ideju o stvaranju okretnog magnetskog polja Edisonvim zaposlenicima. Bez obzira na to kad je Tesla prvi put osmislio višefazni izmjenični motor, izumitelj inzistira na tome da je, u roku od dva mjeseca od tog otkrića, osmislio ne samo sve dizajne motora, već i sve inačice AC distribucijskih sustava po kojima će postati poznat.<sup>24</sup>

Prvenstvo izuma je poput sportskog natjecanja – samo je jedan pobjednik i samo se on pamti. To se često svodi na to tko će prvi utrčati u patentni ured te tko ima moćnije zaštitnike u slučaju sudskih sporova o pravu na prvenstvo izuma. U veličanju izumitelja vrlo veliku ulogu imaju nacionalizmi i provincijski duh. Svi

---

<sup>19</sup> Isto, str. 42.

<sup>20</sup> R. G. Fleagle, *The Audibility of Thunder*, 1949., str. 411-412.

<sup>21</sup> V. A. Rakov, M. A. Uman, *Lightning – Physics and Effects*, 2003., str. 35.

<sup>22</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 22.

<sup>23</sup> N. Tesla, *Moji pronalasci – My Inventions*, 1990., str. 44.

<sup>24</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 96-97.

se žele „dičiti“ veličinom svog sunarodnjaka samo zato što je slavan – neki iz neznanja, neki zbog sebi ljubila ili pak osobne beznačajnosti. Nikolu Teslu, naturaliziranog Amerikanca rođenog 1856. godine u Austrijskom Carstvu, koje je 1867. godine preustrojeno u Austro-Ugarsku Monarhiju, danas svojataju Hrvati, Srbi pa čak i Rumunji. Međutim, svi su njegovi bliski preci rođeni u današnjoj Republici Hrvatskoj, a pretpostavlja se da se dio Teslinih predaka doselio u Liku iz zapadne Srbije još potkraj sedamnaestog stoljeća.<sup>25</sup>

## 2. Neki važni izumi koji su prethodili elektrifikaciji svijeta

Talijanski je fizičar Alessandro Volta 1800. godine napravio prvi elektrokemijski članak, odnosno prvi umjetni izvor električne energije. Tome su prethodila opažanja talijanskog liječnika i fizičara Luigija Galvanija o električnim pojavama pri dodiru dvaju različitih metala i žabljih krakova. Volta je prvotno u razrijeđenu sumpornu kiselinu uranjao srebrne i bakrene elektrode, a potom srebrne i cinčane elektrode. Nazivni napon članka je bio oko 1,1 V, a nedostatak mu je bio to što mu se tijekom upotrebe vrlo brzo napon snizi na neznatan iznos.

Danski fizičar i kemičar Hans Cristian Oersted (Ørsted) je 1820. godine slučajno otkrio da električna struja koja teče vodičem (električni naboj u gibanju) oko sebe stvara magnetsko polje. Dotad se smatralo da su elektricitet i magnetizam dvije međusobno neovisne pojave.

Francuski fizičar, astronom i političar Dominique François Arago je 1824. godine otkrio da bakreni disk, koji rotira ispod kompasa, zakreće kompas i kod brže vrtnje diska izaziva vrtnju kompasa. To je tada bilo nešto potpuno neobjašnjivo. Britanski su izumitelji Charles Babbage i John F. W. Herschel preinačili Aragoov pokus tako što su ispod bakrenog diska vrtjeli permanentni potkovasti magnet, koji je za sobom vukao bakreni disk (Sl. 1).

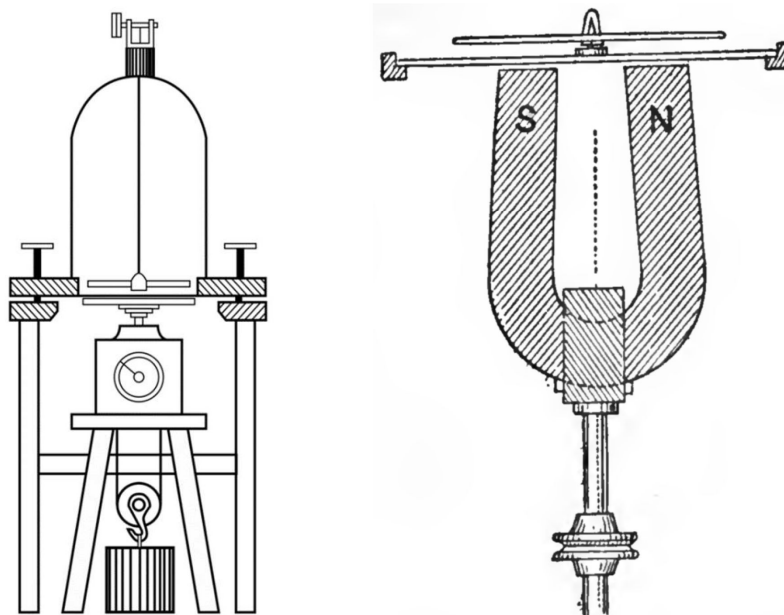
Tek je britanski eksperimentalni fizičar i izumitelj Michael Faraday 1831. godine razjasnio Aragoovu rotaciju, shvativši da ručno stvoreno okretno magnetsko polje magneta inducira tzv. vrtložne struje u bakrenom disku pa time i okretno magnetsko polje diska. Okretno magnetsko polje magneta za sobom vuče inducirano okretno magnetsko polje diska, što ima za posljedicu vrtnju diska. Na taj je način objasnio princip rada: asinkronog AC motora, električnog brojila i elektromagnetske kočnice. Osim što je Michael Faraday razjasnio Aragoovu rotaciju, ujedno je konstruirao prvi DC generator (tzv. Faradayev disk).<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014., str. 27.

<sup>26</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 73.

Michael Faraday je 1831. godine otkrio zakon elektromagnetske indukcije. Smatra se da je nezavisno do istog otkrića istodobno došao američki izumitelj Joseph Henry, koji je svoje otkriće obznanio 1832. godine.<sup>27</sup> Iako je općeprihvaćeno da je Michael Faraday prvi otkrio zakon elektromagnetske indukcije, pojavili su se i članci u kojima se tvrdi da je talijanski fizičar Francesco Zantedeschi u svom članku objavljenom 1829. godine prvi opisao elektromagnetsku indukciju.<sup>28</sup> Bez obzira na to tko je prvi otkrio zakon elektromagnetske indukcije, to je zasigurno jedno od najvažnijih otkrića u ljudskoj povijesti. Ovaj je zakon temelj AC sustava i opće elektrifikacije. Ovaj zakon kaže da vremenski promjenjivo magnetsko polje stvara električnu struju, koja je izmjenična. Dakle, Faraday je, ujedno, otkrio i kako stvoriti izmjeničnu struju. Faraday je 1831. godine u dokazivanju zakona elektromagnetske indukcije koristio i transformator s torusnom željeznom jezgrom i dva namota, ali on tada nije shvatio stvarni značaj ovog svog pratransformatora.



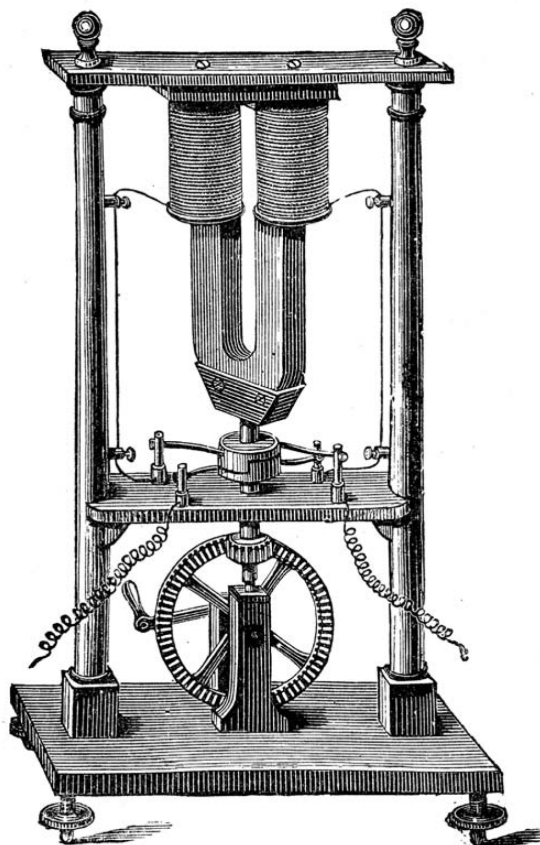
Sl. 1.: Aragoov rotacijski disk (lijevo) te Babbageova i Herschelova modifikacija<sup>29</sup>

<sup>27</sup> G. S. Smith, *Joseph Henry's Role in the Discovery of Electromagnetic Induction*, 2016., str. 1-18.

<sup>28</sup> S. Selleri, *Faraday-Neuman-Lenz Law of Induction or Zantedeschi-Neuman-Lenz Law of Induction?*, 2017., str. 73-76.

<sup>29</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternating-Current Motors*, 1895., str. 71-72.

Potaknut otkrićem elektromagnetske indukcije, francuski je izumitelj Hippolyte Pixii 1832. godine konstruirao prvi jednofazni AC generator (Sl. 2). Nažalost, mladi je znanstvenik umro pod nerazjašnjenim okolnostima samo dvije godine poslije i nema dokaza da je od svog generatora ikada zaradio i novčić. Budući da se tada izmjenična struja nije mogla iskoristiti, on je svom AC generatoru dodao kolektor (komutator) i pretvorio ga u DC generator. Prva poznata praktična primjena izmjenične struje dogodila se tek 1855. godine na području elektroterapije, kada je izumitelj elektroterapije Guillaume Duchenne objavio da je izmjenična struja bolja od istosmjerne struje za elektroterapeutsko stvaranje mišićnih kontrakcija.<sup>30</sup>



Sl. 2.: Skica Pixijevog jednofaznog AC generatora

---

<sup>30</sup> R. Tiktinsky et al., *Electrotherapy – Yesterday, Today and Tomorrow*, 2010., str. 126-131.

### 3. Sastavnice elektroenergetskog sustava

Opća elektrifikacija utemeljena na DC sustavu nije bila moguća zbog nemogućnosti prijenosa DC energije na veliku udaljenost i nemogućnosti jednostavne prilagodbe DC napona nazivnom naponu trošila. Za uspješnu opću elektrifikaciju svijeta bilo je potrebno izumiti i konstruirati: sinkrone AC generatore, sinkrone i asinkrone AC motore, transformatore, električne vodove i električna brojila. Prvi poticaj za opću elektrifikaciju bila je potreba za kvalitetnom rasvjetom kao što je električna rasvjeta. Električne su žarulje, važna sastavnica električne rasvjete, bile izumljene i proizvedene za potrebe DC električne rasvjete.

### 4. Sinkroni AC generatori

Sinkroni se AC generatori mogu koristiti i kao sinkroni AC motori, odnosno oni su reverzibilni, pa je povijest razvoja sinkronih AC generatora ujedno i povijest razvoja sinkronih AC motora.

#### 4.1. Jednofazni sinkroni AC generatori

Pixijev jednofazni sinkroni AC generator nije poslužio u praksi. Međutim, belgijski je izumitelj Zénobe Théophile Gramme oko 1877. godine konstruirao jednofazne sinkrone AC generatore (alternatore) koji su imali važnu praktičnu primjenu, a služili su za napajanje Jabločkovljevih lučnih svjetiljki (ulična rasvjeta Pariza). Grammeov je alternator po konstrukciji bio višefazni generator, ali je korišten samo kao skup jednofaznih sinkronih AC generatora.<sup>31</sup>

Godine 1881. jednofazni sinkroni AC generator njemačke tvrtke Siemens & Halske, pogonjen vodenicom, napajao je uličnu rasvjetu u gradu Godalmingu, u Velikoj Britaniji. Britanski elektroinženjer James Edward Henry Gordon konstruirao je 1882. godine dotad najveći jednofazni sinkroni AC generator nazivne snage 350 kW. Britanski elektroinženjer Sebastian Ziani de Ferranti 1882. godine dizajnirao je i patentirao još veći jednofazni sinkroni AC generator, ali mu je patent naknadno poništen jer je utvrđeno da je dizajn generatora napravio William Thomson (Lord Kelvin) – koji je zapravo pomogao Ferrantiju u izgradnji prvog upotrebljivog modela.<sup>32</sup>

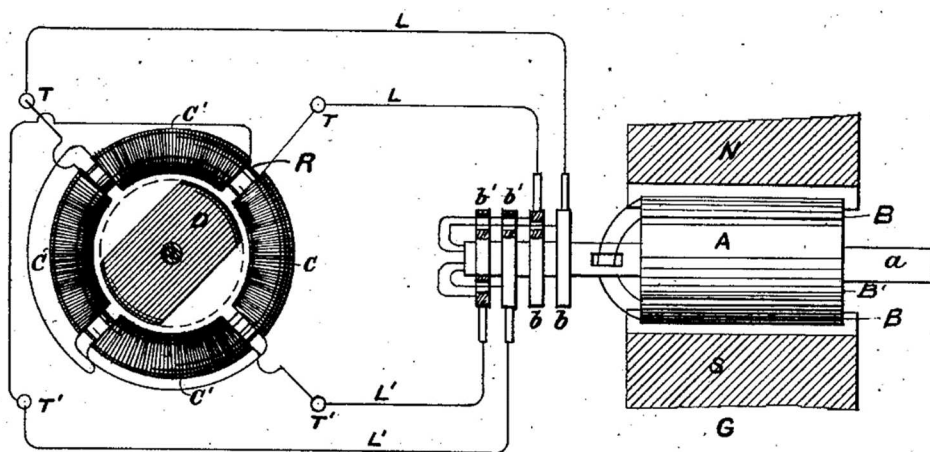
---

<sup>31</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 17-18.

<sup>32</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 93-94.

## 4.2. Višefazni sinkroni AC generatori

Amerikanac Charles Shank Bradley, Edisonov zaposlenik, vjerojatno je eksperimentirao s višefaznim motorima i višefaznim strujama prije nego što je talijanski fizičar Galileo Ferraris objavio rezultate svojih eksperimenata, ali nije u cijelosti shvatio značaj svojih istraživanja niti iz njih izvukao ispravne zaključke.<sup>33</sup> Početkom svibnja 1887. godine Bradley je podnio patentnu prijavu za dva preinačena DC stroja na koje je dodao po 4 klizna prstena i na taj način dobio dvofazni sinkroni AC generator i dvofazni sinkroni AC motor. Patentna je prijava bila prihvaćena početkom listopada 1888. godine. Prema ovom patentu, u dvopolnom generatoru s Grammeovim prstenom, četiri simetrično smještene točke na armaturnom namotu oba stroja bile su povezane na po četiri klizna prstena. Tako su dobivene dvije izmjenične struje fazno pomaknute za 90 električnih stupnjeva. Ovaj se stroj mogao koristiti kao AC ili DC generator te kao AC ili DC motor.<sup>34</sup> Dakle, Bradley je 1887. godine prvi prijavio patent za dvofazni AC prijenos električne energije s četiri vodiča, pola godine prije prijave Teslinih američkih patenata br. 382.279, 382.280 i 382.281.



Sl. 3.: Dvofazni AC prijenosni sustav - dvofazni sinkroni AC generator i dvofazni sinkroni AC motor iz Teslinog američkog patenta br. 382.280

Nikola Tesla je svoje najvažnije patente vezane za AC generatore, AC motore i prijenos električne energije prijavio krajem 1887. godine. Taj je skup

<sup>33</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 61.

<sup>34</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 413.

patenata prihvaćen 1. svibnja 1888. godine, a patentna prava za te patente Tesla je prodao u srpnju 1888. godine tvrtki Westinghouse. Nakon prihvaćanja ovih patenata, 16. svibnja 1888. godine, Tesla je održao već spomenuto predavanje u američkoj elektrotehničkoj udruzi AIEE. Teslin dvofazni AC prijenosni sustav s četiri vodiča prikazan je na Sl. 3.

Bradley je svoje inovativne ideje zaštitio mnogim američkim patentima. U patentu (prijavljenom u listopadu 1888. godine, prihvaćenom u kolovozu 1889. godine) bio je blizu otkrića trofaznog AC sustava jer je predložio da se prstenasti armaturni namot DC stroja, kako bi se postigao najmanji mogući broj kliznih prstenova i vodiča, treba podijeliti na tri jednaka dijela, odnosno načiniti tri simetrično raspoređena priključka. Na taj bi se način dobile tri izmjenične struje fazno pomaknute za 120 električnih stupnjeva.<sup>35</sup>

Nijemac Friedrich August Haselwander prošao je gotovo isti istraživački put kao i Bradley. Inspirirao se u svojoj radionici 1887. godine tijekom popravka malog istosmjernog stroja američke tvrtke Thomson-Houston. U ovom su tipu stroja krajevi triju armaturnih namota na rotoru bili spojeni na unutarnju neutralnu točku, a drugi krajevi namota na trosegmentni komutator. Praktičar Haselwander došao je na ideju „zaobići dvije suprotne operacije ispravljanja izvorno izmjeničnih fazno pomaknutih struja na izlazu generatora i izmjenjivanja istosmjerne struje na ulazu u motor, tj. zaobići komutatore na oba stroja i priključiti dijelove armaturnog namota na tri klizna prstena, te preko klizača poslati tri izmjenične struje s faznim pomakom iz generatora u tri dijela armaturnog namota motora, koji su, također, spojeni u zvijezdu“. Kako bi provjerio svoju ideju u praksi, Haselwander je 1887. godine izradio drugi stroj. Ovaj je imao trofazni armaturni namot na statoru i četveropolni rotor. Ovaj se trofazni AC generator još uvijek može vidjeti u Deutsches Museum u Münchenu. On se smatra prototipom trofaznog sinkronog AC generatora s izraženim polovima.<sup>36</sup>

August Haselwander loše je prošao s patentnim prijavama i ostvarivanjem svojih patentnih prava. Nemar njegova patentnog zastupnika i nesretni odabir partnerstva za prijenos patenta zasigurno su bili presudni. Vrijedne ideje i rad Haselwandera na području trofaznog prijenosa električne energije ostali su praktički bez ikakve patentne zaštite.<sup>37</sup> U kolovozu 1887. godine započeo je s izradom trofaznog generatora, a u listopadu 1887. godine tim je generatorom napajao rasvjetu. Proizvodno poduzeće W. Lahmeyer & Co. iz Frankfurta na Majni kupilo je licencu za Haselwanderov patent, ali je kasnije patent proglašen nevažećim kada ga je osporila druga njemačka elektrotvrtka, AEG (Allgemeine

---

<sup>35</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 61.

<sup>36</sup> Isto, str. 61-62.

<sup>37</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 413-414.



Elektricitäts-Gesellschaft) iz Berlina. Sudovi su naknadno presudili da je Tesla imao prednost u odnosu na Bradleyja i Haselwandera, zbog cjelovitosti Teslinih patenata.<sup>38</sup>

### 4.3. Sinkroni AC generatori tvrtke Ganz

Početnom razvoju sinkronih AC generatora mađarske tvrtke Ganz posvetio sam ovo posebno potpoglavlje jer je to od velike važnosti za razotkrivanje zagubljene istine o počecima elektrifikacije Hrvatske, s posebnim naglaskom na elektrifikaciju Dalmacije, krajem 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća, odnosno u doba Austro-Ugarske Monarhije.

Ábrahám Ganz, rođen u Švicarskoj, osnovao je svoju ljevaonicu u Budimu, današnjoj Budimpešti, 1844. godine. Ona je kasnije preimenovana u Ljevaonicu i tvornicu strojeva Ganz & Co. te se, unutar jedne generacije, ovaj u početku mali pogon razvio u značajno strojarско poduzeće. Nekoliko godina nakon smrti Ábraháma Ganza, koji je preminuo 1867. godine, András Mechwart, inženjer strojarstva postao je tehnički direktor, a potom i generalni direktor tvrtke. Mechwart je, vjerojatno pod utjecajem onoga što je vidio na Svjetskoj izložbi u Parizu 1878. godine, shvatio da budućnost leži u elektrotehnici. Stoga je u kolovozu 1878. osnovao elektrodjel tvrtke Ganz. Ovaj je odjel vodio 25-godišnji inženjer strojarstva Károly Zipernowsky, koji je plijenio pozornost svojim predavanjima iz elektrotehnike. Iz ove male radionice nastala je prva elektrotvornica Austro-Ugarske Monarhije, što je čini jednom od najstarijih u Europi. Već tijekom nekoliko idućih mjeseci proizveden je prvi DC generator (56 V, 12 A) i lučne svjetiljke za električnu rasvjetu ljevaonice u ulici Kórház. Prve lučne svjetiljke mađarske proizvodnje tamo su zasvijetlile 1878. godine, jedva dvije godine nakon uspjeha koji je Edison postigao u Philadelphiji.<sup>39</sup>

Iz sljedećih razloga Zipernowsky je postao zagovornikom izmjenične struje: istosmjerna struja morala je izlaziti iz rotora dinama; komutator korišten u tu svrhu bio je delikatne konstrukcije koja se teško mogla sigurno proizvesti tehnologijom tog vremena. Unatoč tome, izmjeničnu struju može proizvesti generator kod kojeg se struja uzima iz statora, a namoti se mogu napraviti za više napone, štoviše, potrošači (žarulje) se, također, mogu spojiti na odvojene namote. U isto vrijeme, vijek trajanja žarulja sa žarnom niti, koje je izumio Edison 1879. godine, pokazao se bitno duljim ako se napajaju izmjeničnom strujom. Da bi svoje uvjerenje potvrdio, Zipernowsky se morao osloniti na eksperimente.

---

<sup>38</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 118.

<sup>39</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 3-4.

Njegovi su pokusi, vjerojatno, izvedeni na višepolnom jednofaznom AC generatoru, koji je patentirao 1880. godine. Njegov rotor je bio snabdjeven i komutatorom i kliznim prstenovima.<sup>40</sup>

Od tog vremena tvornica kontinuirano proizvodi sinkrone AC generatore, u početku jednofazne, pogonjene klipnim parnim strojem. Prvi jednofazni sinkroni AC generatori tvrtke Ganz imali su oznaku W (*njem. Wechselstrom*). Već je u tim strojevima uzбудni namot bio na rotoru, a jednofazna se izmjenična EMS inducirala u armaturnom statorskom namotu. Uzбудnu je struju davao relativno manji DC generator. Konstrukcija strojeva neprestano se poboljšavala, a ujednačenija tipska serija pojavila se tek nekoliko godina kasnije. Generatori su bili pokretani ili pomoću remenskog prijenosa ili su bili izravno povezani s parnim strojem. Izvedbu, u kojoj su sinkroni AC generator i uzбудnik (DC generator) imali zajedničku osovinu, prva je u svijetu koristila tvornica Ganz.<sup>41</sup>

Vrijedan je spomena jednofazni AC generator tipa W pogonjen parnim strojem od 150 KS i spojen na DC uzбудnik koji je napajao 1.200 - 1.600 žarulja sa žarnom niti u kazalištu Asphalea tijekom Međunarodne elektrotehničke izložbe u Beču 1883. godine. Nakon toga je ova oprema osvjetljavala istočni željeznički kolodvor u Budimpešti 30 godina. Do 1885. godine u tvornici su dovršena četiri slična stroja. Prva dva generatora, od ukupno četiri generatora snage 600 KS u elektrani u rimskoj četvrti Cerchi imala su oznaku W8. Ovi su strojevi u to vrijeme reklamirani pod nazivom "*Dampf-Lichtmaschine*", odnosno kao parni osvjetljivači.<sup>42</sup>

Elektroodjelu tvrtke Ganz 1882. godine pridružio se Miksa Déri, koji je iste godine, zajedno sa Zipernowskim, razvio samouzbudni jednofazni AC generator (tip SW). Struktura ovog generatora bila je slična strukturi generatora tipa W, ali je imao poseban komutator koji je mogao proizvesti uzbudnu istosmjernu struju iz jednog dijela armaturne struje. Ovi su generatori izazvali senzaciju i na Međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi u Beču 1883. godine i na Općoj talijanskoj izložbi u Torinu 1884. godine. Tvrtka Ganz je za svoj SW generator nagrađena drugom nagradom na izložbi u Torinu. Međutim, nedostatak ovih samouzbudnih generatora bio je to što su se pokazali neprikladnim za paralelni rad generatora.<sup>43</sup>

Jednofazni sinkroni AC generatori tipa W i SW proizvodili su se do 1890. godine. Korištenje transformatora, kao i izgradnja većih elektrana, a kasnije i zahtjev za paralelnim radom generatora, zahtijevali su razvoj novih generatora veće snage. To je bila serija jednofaznih generatora tipa A. Prvi generatori tipa A isporučeni su u Rim, češke Mariánske Lázně i urugvajski glavni grad

---

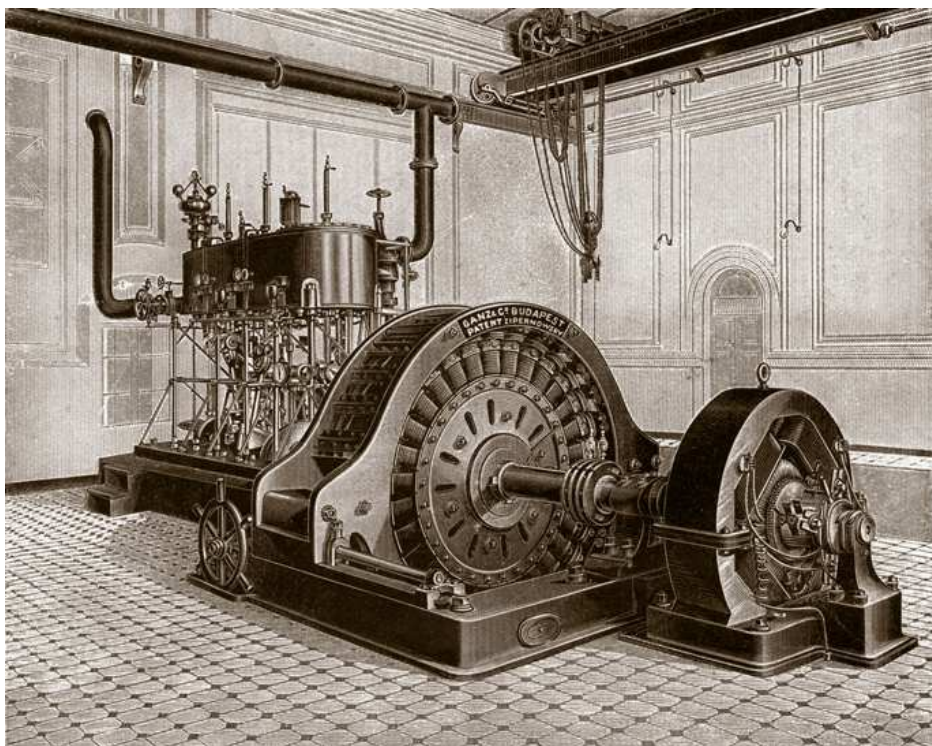
<sup>40</sup> Isto, str. 5.

<sup>41</sup> Isto, str. 6.

<sup>42</sup> Isto, str. 6.

<sup>43</sup> Isto, str. 6-7.

Montevideo. U veliki broj jednofaznih elektrana, koje je izgradila tvrtka Ganz od 1889. do prijelaza stoljeća, ugrađeni su takvi generatori, proizvedeni prema Zipernowskyjevom patentu. Druga dva velika generatora elektrane u rimskoj četvrti Cerchi bila su tipa A8. Serija se sastojala najprije od 8, a potom od 14 podtipova. Jednofazni AC generator tipa A7 prikazan je na Sl. 4. Važno je prikazati fotografiju ovog jednofaznog AC generatora jer je upravo takav generator tvrtka Ganz 1894. godine isporučila za HE Krku (Jarugu 1), koja je puštena u pogon 28. kolovoza 1895. godine.



Sl. 4.: Jednofazni AC generator tipa A7 izravno spojen s parnim strojem i DC uzбудnikom (ranih 1890-ih godina)<sup>44</sup>

Važno je istaknuti da je tvrtka Ganz tek 1896. godine započela s proizvodnjom dvofaznih i trofaznih AC generatora, koji su bili tipa AF, a izrađeni su prema dizajnu Kálmána Kandóa. Većina ih je imala dva jednofazna statora tipa A i nazubljeni rotor koji se okretao unutar dva statora. Generatori tipa AF se,

<sup>44</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895* (hrv. *Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.*), 2013., Prilog str. 28.

s povijesnog gledišta, smatraju prijelaznim tipovima generatora i imali su nekoliko podtipova. Prvi višefazni AC generatori tipa AF proizvedeni su za Milenijsku izložbu u Budimpešti 1896. godine.<sup>45</sup>

Nakon ovog prijelaznog razdoblja, višefazni sinkroni AC generatori s istaknutim polovima počeli su se proizvoditi 1898. godine u Ganzovoj tvornici. Ove je strojeve dizajnirao Ottó Titusz Bláthy, koji se zaposlio u tvrtki Ganz 1883. godine. Prvi izvještaji o generatorima tipa O datiraju iz 1896. i 1897. godine. Ovi generatori su imali rotorske polove kružnog poprečnog presjeka, uzbudni namot od plosnatog bakra na rotoru i trofazni (rjeđe dvofazni) namot na statoru. Takvi su se generatori proizvodili do početka Drugog svjetskog rata. Među prvim proizvedenim trofaznim generatorima ovog tipa bili su oni koji su isporučeni tijekom nadogradnje hidroelektrane Tivoli, a pušteni su u pogon 1898. godine. Kasnije su višefazni AC generatori s istaknutim polovima tipa OA, OB, OC i OE bivali sve veći i suvremeniji te su instalirani u nekoliko elektrana diljem svijeta.<sup>46</sup>

Tvrtka Ganz je proizvodila i vodne turbine od 1866. godine, a isporučila je trofazne hidrogeneratore u nekoliko zemalja diljem svijeta. Među njima treba istaknuti četiri 12-polna hidrogeneratorsa od 5,2 MVA, 42 Hz, izrađena 1904. godine za HE Manojlovac (Miljacku) u Dalmaciji. Osim toga, u prvim godinama 20. stoljeća, izrađeni su hidrogeneratorsi snage 5 MVA, 12-polni i 24-polni; dva za HE Subiaco (blizu Tivolija i Rima - 1905. godine) i dva za HE Arci (blizu Tivolija i Rima - 1910. godine). Svih ovih osam generatorsa napravljeno je sa statorskim nazivnim naponom od 30 kV, kao i dva 16-polna generatorsa snage 7,5 MVA isporučena za HE Alessandro Volta u Castel Madami (također blizu Tivolija i Rima) na početku Prvog svjetskog rata. Ova izolacija generatorsa je u to vrijeme bila jedinstvena.<sup>47</sup> Dakle, osim HE Manojlovca (Miljacke), nazivni napon trofaznih generatorsa od 30 kV imale su još tri talijanske hidroelektrane sagrađene početkom 20. stoljeća. Međutim, u hrvatskoj se literaturi često pogrešno sugerira da je taj neuobičajeni nazivni napon trofaznih generatorsa od 30 kV imala samo HE Manojlovac (Miljacka).<sup>48</sup>

Veliki pothvat tvrtke Ganz bila je izgradnja trofazne hidroelektrane Kraljevac, koja je sagrađena 1912. godine. Prva dva trofazna hidrogeneratorsa nazivne snage 16 MVA puštena su u pogon 1913. godine, dok su druga dva trofazna hidrogeneratorsa nazivne snage 26 MVA puštena u pogon 1932. godine. Ti su generatorsi u trenutku puštanja u pogon bili među najvećim hidrogeneratorima na svijetu.

---

<sup>45</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 8.

<sup>46</sup> Isto, str. 9.

<sup>47</sup> Isto, str. 9.

<sup>48</sup> Ž. Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, 2006., str. 6.

## 5. Asinkroni AC motori

Sinkroni AC generator može raditi i kao sinkroni AC motor. Od posebne je važnosti bio razvoj asinkronog (indukcijskog) AC motora, koji je robusniji od sinkronog AC motora i jednostavniji za upotrebu jer na sekundaru nema uzbudnog namota. Babbageova i Herschelova modifikacija Aragoovog rotirajućeg diska (Sl. 1) dokazala je da se ručnom vrtnjom potkovastog permanentnog magneta može izazvati vrtnja bakrenog diska. Ključni je problem bio kako pomoću električne struje stvoriti okretno magnetsko polje.

Britanski elektroinženjer Walter Baily je prvi 1879. godine pomoću simulirane dvofazne izmjenične struje okretao bakreni disk.<sup>49</sup> Baily je izmjeničnu struju simulirao pomoću rotacijske preklapke jer tada nije imao na raspolaganju dvofaznu izmjeničnu struju. Nažalost, pomoću ovog uređaja nije mogao postići dovoljno veliku snagu da bi takav motor mogao poslužiti u praksi. Baily je ovu skromnu preteču višefaznog asinkronog AC motora predstavio Fizikalnom društvu u Londonu 28. lipnja 1879. godine. Kada se profesor Guthrie našalio pitajući o značajkama njegova motora, Baily je skromno odgovorio da trenutno ovaj sustav vidi samo kao znanstvenu igračku. Iako Baily nije nastavio s razradom svoje ideje i ne može se dokazati izravni utjecaj njegova razmišljanja na kasniji razvoj asinkronog AC motora, ipak se mora zaključiti da je predstavljena igračka „već sadržavala dvije bitne značajke kasnijeg trofaznog asinkronog AC motora“: jedno kružno rotirajuće magnetsko polje i metalnu masu (bakreni disk) koja se okreće pod indukcijskim učinkom ovog polja.<sup>50</sup> Baily nije iskoristio to što je prvi shvatio da se pomoću višefaznih izmjeničnih struja, koje su pomaknute fazno i geometrijski, može stvoriti okretno magnetsko polje.

Četiri godine poslije, u studenome 1883. godine, Francuz Marcel Deprez održao je predavanje u kojem je opisao svoju ideju o dva para namota, geometrijski pomaknuta za 90 stupnjeva, koji se napajaju izmjeničnim strujama pomaknutim za 90 električnih stupnjeva. Magnetska se igla uslijed okretnog magnetskog polja okretala brzinom koja točno odgovara brzini okretnog polja. Deprezovo predavanje očito je ostalo nezapaženo jer se odnosilo na usku specijalnost. Međutim, ono sadrži toliko vrijedan skup ideja i svjedoči o takvom znanju o stvaranju i učinku okretnih polja da je teško razumjeti zašto Deprez nije svoje znanje upotrijebio za razvoj asinkronog AC motora. Iako je Deprez otkrio kako stvoriti okretno magnetsko polje, iskoristio je to znanje za izum geomagnetskog kompasa, a ne asinkronog AC motora.<sup>51</sup>

Dvije godine kasnije, 1885. godine, talijanski profesor fizike Galileo Ferraris, sretno je spojio ideje Bailya i Depreza, vjerojatno ne znajući za njihov

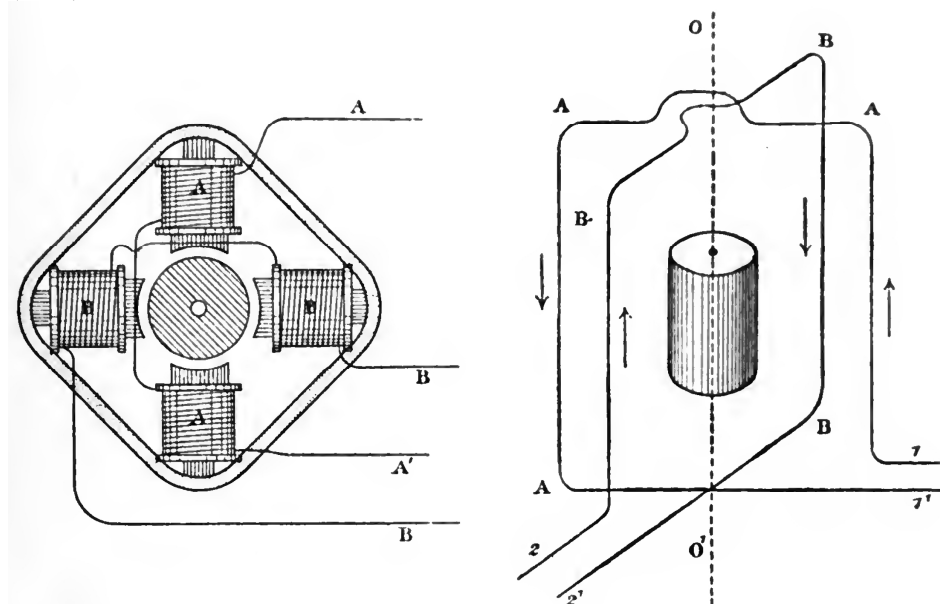
---

<sup>49</sup> W. Baily, *A Mode of Producing Arago's Rotation*, 1879., str. 115-119.

<sup>50</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 410.

<sup>51</sup> Isto, str. 410.

rad, ali ni on nije bio svjestan značaja svog djela. Koristeći analogiju s optikom, shvatio je da se jednoliko rotirajuće magnetsko polje konstantnog iznosa može generirati pomoću dvije zavojnice koje su prostorno okomite jedna na drugu i kroz koje teku izmjenične struje iste amplitude i iste frekvencije, ali fazno pomaknute za četvrtinu perioda struje. Unutar zavojnica smjestio je slobodno rotirajući komad bakra koji je rotirao pod utjecajem okretnog magnetskog polja (Sl. 5).



Sl. 5.: Skica Ferrarisovog dvofaznog asinkronog AC motora objavljena 1888. godine<sup>52</sup>

Prema toj ideji, Ferraris je 1885. godine izradio mali model motora, koji je osam godina kasnije bio izložen na Svjetskoj kolumbovskoj izložbi u Chicagu. Nažalost, Ferraris je objavio svoj rad tek nakon predavanja održanog 18. ožujka 1888. godine na Kraljevskoj akademiji znanosti u Torinu. U tom svom članku iz 1888. godine, profesor Ferraris je, između ostalog, u teoriju izmjenične struje uveo pojam faze.<sup>53</sup> Profesor Galileo Ferraris je odugovlačio s objavom rezultata svojih eksperimenata jer je pogrešno zaključio da će asinkroni AC motor imati maksimalnu korisnost 50 % pa da se stoga neće moći koristiti u industriji i nema se smisla baviti njegovim razvojem.<sup>54</sup> Koji katastrofalno pogrešan zaključak

<sup>52</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 89.

<sup>53</sup> G. Ferraris, *Rotazione elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate*, 1888., str. 246-263.

<sup>54</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 410.

uglednog sveučilišnog profesora! Ugledni američki istraživač William Stanley je 1903. godine u pismu uredniku časopisu *Electrical Review* izjavio da je u Torinu osobno vidio prototipove motora i crteže koje je napravio Ferraris 1885. godine te da je razgovarao s ljudima kojima je Ferraris demonstrirao rad tih motora i objasnio im princip njihovog rada.<sup>55</sup> Međutim, Ferraris se odlučio na objavu rezultata svojih istraživanja tek kad je čuo da Charles S. Bradley i neki drugi izumitelji pokušavaju napraviti višefazni asinkroni AC motor.

Ferrarisovom predavanju, održanom 18. ožujka 1888. godine, pridana je velika važnost. To se može zaključiti iz njegove brze distribucije. Nakon otprilike tri tjedna već je u tiskanom obliku poslano tajniku Akademije, istoga dana 150 primjeraka poslano je raznim časopisima i znanstvenicima; deset dana kasnije izvadak se pojavio u časopisu *Mailänder Journal d'Elettricità*. U Americi je bio izvanredan odjek. Tvrtka Westinghouse je telegramom preko svog suradnika inženjera Guida Pantaleonija od Ferrarisa zatražila dopuštenje za podnošenje prijave za američki patent njegovog izuma. Ferraris je u početku odbijao ući sa svojim izumom u posao s Pantaleonijem, ali spoznaja da bi tvrtka Westinghouse mogla izum učiniti korisnim za elektrotehniku, navela ga je da to prihvati. Naknada je trebala iznositi samo tisuću američkih dolara. Međutim, dogovor nije postignut, jer se u međuvremenu sa svojim patentima u SAD-u pojavio Nikola Tesla.<sup>56</sup> Da je tada otkupio Ferrarisov izum, Westinghouse bi izbjegao mnoge naknadne sudske sporove vezano za prvenstvo izuma asinkronog AC motora.

Ferraris je u svom članku iz 1888. godine predložio izradu mjernih AC instrumenata na temelju predloženog principa rada dvofaznog asinkronog AC motora. Predložio je i kako od jedne faze napraviti dvije faze, tj. opisao je izum jednofaznog asinkronog AC motora i, ujedno, jednofaznog sinkronog AC motora. Sudski sporovi su se prvenstveno vodili zato što Nikola Tesla u svojim patentima prihvaćenim 1. svibnja 1888. godine nije niti spomenuo jednofazni asinkroni AC motor i razdvajanje jedne faze na dvije faze. Tesla je tek u prosincu 1888. godine prijavio patente koji su sadržavali modifikaciju njegovog višefaznog asinkronog AC motora, koja mu je omogućila rad kao jednofaznog asinkronog AC motora. Međutim, zahvaljujući tome što je tvrtka Westinghouse kupila Tesline patente i bila tužitelj za povredu patentnih prava za izum jednofaznog asinkronog AC motora, pravomoćno izgubljeni sudski spor 1903. godine protiv jedne tvrtke, Westinghouse je pretvorio u pravomoćno dobiveni protupravno pokrenuti istovrsni sudski spor protiv druge tvrtke, započet 1904. godine i okončan 1905. godine. Prema pravnoj doktrini *res judicata*, Westinghouseu je trebala biti odbijena tužba na temelju zahtjeva koji je sud već razmotrio i pravomoćno presudio u žalbenom postupku. U novom protupravnom sporu presudno je bilo

---

<sup>55</sup> W. Stanley, *The Ferraris-Tesla Inventions - To the Editor of Electrical Review*, 1903., str. 415.

<sup>56</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 410-411.

svjedočenje Nikole Tesle i to što se iznenada pojavio prototip jednofaznog asinkronog AC motora, a koji je prema Teslinim riječima on izradio negdje u veljači 1887. godine, tj. prije javnog predstavljanja rada profesora Ferrarisa. Prema Teslinim riječima izrečenim tijekom svjedočenja na sudu, prototip jednofaznog asinkronog AC motora, koji se iznenada pojavio, iako je glavni Teslin financijer Alfred Brown prethodno na sudu tvrdio da je stradao u požaru, preživio je jer je bio poslan u Patentni ured u Washingtonu, D.C., nešto prije požara 1895. godine, koji je uništio Teslin laboratorij na Petoj aveniji. Za suca Johna Raymonda Hazela, Teslino je svjedočenje, koje je izumitelj „izričito i nedvosmisleno iznio“ i dodatno ga podržao Brown, bilo dovoljno da zaključi da je Tesla razmišljao o jednofaznom dizajnu asinkronog AC motora prije nego što ga je predstavio Ferraris. U novije su doba savezni američki sudovi više puta presudili da je svjedočenje samog izumitelja nedovoljno za utvrđivanje datuma izuma i da se to mora neovisno potvrditi.<sup>57</sup>

Teslino navodno iznenadno otkriće principa rada asinkronog AC motora tijekom šetnje budimpeštanskim gradskim parkom 1882. godine, o kojem je Tesla pisao u svojoj autobiografiji,<sup>58</sup> sumnjivo je i Tesli vrlo „sklonom“ Carlsonu, piscu jedne od novijih Teslinih biografija, koji kaže: „Štoviše, uzimajući u obzir ono što je Tesla znao 1882. godine, malo je vjerojatno da je u Budimpešti shvatio sve što je uključio u svoje predavanje u AIEE-u“.<sup>59</sup>

Tesla je svjedočeći na američkom sudu tvrdio da je, radeći u Strasbourgu za Edisonovu tvrtku Société Electrique Edison, 1883. godine u tajnosti napravio prototip asinkronog AC motora, koji je navodno skrivao u ormaru, a taj je motor pogonio Siemensov jednofazni AC generator.<sup>60</sup>

Da nije bilo drugih istraživača na istom polju istraživanja, rezultati rada Nikole Tesle u SAD-u između 1887. i 1891. godine sami po sebi bili bi dovoljni da se motor s okretnim poljem postavi na čvrste temelje. Došao je u SAD 1886. godine s čvrstim uvjerenjem da mora postojati neka metoda za pokretanje rotora strujama induciranim u njemu, umjesto pogona strujama koje se na njega dovode (kao kod DC motora), preko metalnih kontakata, komutatora i četkica. Do listopada 1887. godine Teslin je rad bio dovoljno napredan da Patentnom uredu SAD-a prijavi patente koji pokrivaju brojne točke manje-više temeljnog karaktera. Ostale patentne prijave uslijedile su u studenom i prosincu iste godine, ali nijedna od njih nije prihvaćena do 1. svibnja 1888. godine, kada mu je prihvaćeno više patenata.<sup>61</sup>

---

<sup>57</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 97-109.

<sup>58</sup> N. Tesla, *Moji pronalasci – My Inventions*, 1990., str. 44.

<sup>59</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, str. 63.

<sup>60</sup> Isto, str. 77.

<sup>61</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 93.



Znakovito je to da je Tesla u opisu svog američkog patenta br. 382.280, prihvaćenog 1. svibnja 1888. godine, napisao sljedeće: „**Svjestan sam da nije ništa novo** proizvesti rotacije motora povremenim pomicanjem polova jedne od njegovih sastavnica. To je učinjeno prolaskom struje iz baterije ili drugog izvora istosmjerne ili kontinuirane struje kroz neovisne zavojnice za napajanje na jednoj od sastavnica, mijenjajući takvu struju odgovarajućim mehaničkim uređajima, tako da se usmjerava kroz zavojnice naizmjenično u suprotnim smjerovima. U takvim slučajevima, međutim, jakost struja na izvoru ostaje ista, samo se njihov smjer mijenja. U svom izumu, međutim, koristim prave izmjenične struje; i moj se izum sastoji u otkrivanju načina ili metode korištenja takvih struja“.<sup>62</sup> Dakle, Tesla je, u trenutku iskrenosti, neizravno priznao da je prije prijave svojih патената ipak bio upoznat s radom drugih izumitelja, što prvenstveno ukazuje na Bailyjev rad.

Koliko je meni poznato, Teslini patenti koje je prodao 1888. godine tvrtki Westinghouse praktično su jedini patenti na kojima je Tesla nešto i zaradio. To može prvenstveno zahvaliti elektroinženjeru Alfredu S. Brownu i odvjetniku Charlesu F. Pecku (umro 1890. godine), koji su uložili novac u Teslina istraživanja tako što su u travnju 1887. godine zajedno s Teslom osnovali tvrtku Tesla Electric Company.<sup>63</sup> Peck i Brown uobličili su svoju poslovnu strategiju za Tesline izume koja se može svesti na frazu „*patentiraj – promoviraj – prodaj*“.<sup>64</sup> Nakon Peckove smrti, Brown nije bio u stanju sam uspješno voditi tu kampanju. Peckova je smrt bila veliki gubitak za Nikolu Teslu. Zahvaljujući toj strategiji i njihovoj lukavoj obmani Goergea Westinghousea da druga tvrtka želi odmah skupo platiti Tesline patente, Peck i Brown vrlo su skupo prodali Tesline patente tvrtki Westinghouse u srpnju 1888. godine.<sup>65</sup>

I Tesla se prije toga poslužio lukavstvom da bi impresionirao Pecka i Browna i pridobio ih za financiranje svojih istraživanja. Tesla je, umjesto limenke, u okretnom magnetskom polju vrtio bakreno jaje, koje je nazvao Kolumbovim jajetom, aludirajući na općepoznatu legendu prema kojoj je Kristofor Kolumbo nadmudrio svoje protivnike postavivši jaje na vršak tako što je prethodno lagano razbio vršak. Taj je događaj Teslu poučio da izum iziskuje dozu teatralnosti kojom se njegova kreacija obavlja velom iluzije. Ljudi ne ulažu u izume načinjene od limenki; ulažu u projekte koji im golicaju maštu. Kako bi se privuklo ljude, često se treba oslanjati na metafore, priče i teme koje u određenoj kulturi imaju važnost – što je Tesla učinio iskoristivši Kolumbovo jaje. Nakon što ih je privukao, Tesla je Pecka i Browna mogao natjerati da razmišljaju o tržišnom

---

<sup>62</sup> Isto, str. 96-97.

<sup>63</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014., str. 90-91.

<sup>64</sup> Isto, str. 112.

<sup>65</sup> Isto, str. 123.

potencijalu njegova motora.<sup>66</sup> Baš kao što je Tesla zagolicao njihovu maštu Kolumbovim jajetom, Peck i Brown su u promociji Teslinih motora morali zagolicati maštu proizvođača. Oblikujući promotivnu kampanju, Peck i Brown zaključili su da Teslu moraju izvući iz anonimnosti.<sup>67</sup>

Početkom 1889. godine elektroinženjer Michael von Dolivo-Dobrowolsky iz njemačke tvrtke AEG konstruirao je prvi trofazni kavezni asinkroni AC motor s kavezom kakav se i danas koriste, a nakon toga je konstruirao i trofazni kliznokolutni asinkroni AC motor od 5 konjskih snaga.<sup>68</sup> To su bili vrlo funkcionalni motori. Međutim, prihvaćeni su mu patentni samo za rotor trofaznih asinkronih AC motora.

Švedanin Jonas Wenström, također, pripada uskom krugu pionira trofaznog AC sustava. U britanskom i švedskom patentu, oba iz 1890. godine, opisao je sve dijelove trofaznog AC prijenosnog sustava, sinkroni AC generator i njegove namote, trofazni transformator, sinkroni AC motor i asinkroni AC motor. Nije poznato je li Wenström bio upoznat s radom ostalih izumitelja, koji su bili jednu do dvije godine ispred njega.<sup>69</sup> Međutim, mala je vjerojatnost da on nije znao za izume drugih izumitelja.

Zanimljivo je pogledati što o povijesti razvoja asinkronog AC motora piše Benjamin G. Lamme, elektroinženjer tvrtke Westinghouse: „*Europske zemlje, treba razumjeti, nisu zaostajale za SAD-om u razvoju samog asinkronog AC motora, a zapravo je Europa na neki način bila godinu ili dvije ispred SAD-a. Povijesni eksperiment Lauffen-Frankfurt iz 1891. godine, gdje je relativno veliki asinkroni AC motor radio na kraju dugog dalekovoda, dobar je primjer. ... Posao s asinkronim AC motorima u ovoj zemlji doista je krenuo 1893. godine. ... Ova prva linija motora bila je za 60 Hz. Radovi na njemu započeli su negdje 1893. godine, a 1894. godine motori su se dovršavali za tržište.*“<sup>70</sup> Dakle, Teslini prototipovi asinkronih AC motora nisu bili upotrebljivi u industriji, a na poboljšanju tih motora, služeći se i teorijskim izračunima, više su godina radili inženjeri tvrtke Westinghouse, do 1890. godine pod vodstvom elektroinženjera Charlesa F. Scotta, a nakon toga pod Lammeovim vodstvom. I Tesla je zajedno sa Scottom radio na razvoju svojih asinkronih AC motora 1888. i 1889. godine. Sav taj veliki trud bio je potreban da bi unaprijeđeni Teslini asinkroni AC motori u industriji radili jednako dobro kao trofazni asinkroni AC motori Michaela von Dolivo-Dobrowolskog, konstruirani početkom 1889. godine.

---

<sup>66</sup> Isto, str. 100-102.

<sup>67</sup> Isto, str. 113.

<sup>68</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 420.

<sup>69</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 65.

<sup>70</sup> B. G. Lamme, *The Story of the Induction Motor*, 1921., str. 203-223.

Potrebno je spomenuti rad barem još nekih izumitelja. Godine 1887. švicarski inženjer François Borel osmislio je AC motor za uporabu u ampersatnom električnom brojilu, poznatom pod imenom Borel-Paccaudovo električno brojilo. Zapravo, to je bio jednofazni asinkroni AC motor.<sup>71</sup> Godine 1887. tvrtka Helios Co. iz Kölna, prema patentu gospodina Coerpera, izradila je neke male AC motore, od kojih su neki bili jednofazni, sinkroni i asinkroni, dok je jedan od njih bio trofazni, koji je imao tri klizna prstena na rotoru. Budući da su za rad jednofaznog AC motora bila potrebna najmanje tri vodiča, a kako u to vrijeme svi napor za postizanje zadovoljavajućeg rada motora s dva vodiča nisu bili uspješni, tvrtka Helios Co. patentirala je 1890. i 1891. godine jednofazni AC motor s pomoćnim namotom koji djeluje samo na željezo rotora, a koristio se samo tijekom pokretanja.<sup>72</sup> U vezi s razvojem višefaznog AC sustava, uvijek se spominje i Oliver B. Shallenberger, glavni elektroinženjer tvrtke Westinghouse Electric and Manufacturing Company, iako su njegove ideje i njegov rad bili važni samo na području razvoja električnog brojila. Za svoje prvo ampersatno AC električno brojilo, patentirano 1888. godine, upotrijebio je jednofazni asinkroni AC motor sa željeznim rotorom i genijalnu metodu za stvaranje okretnog magnetskog polja.<sup>73</sup>

O izumu asinkronog AC motora, povjesničar tehnologije Hughes u svojoj odličnoj knjizi, objavljenoj 1983. godine, piše: „*Postoji i nacionalistička pristranost u tvrdnjama o prvenstvu izuma i razvoju asinkronih AC motora. Talijanska povijest naglašava otkrića Galilea Ferrarisa; američki zapisi često se usredotočuju na Nikolu Teslu i inženjere iz Westinghousea s kojima je radio; jugoslavenski se povjesničari prisjećaju Westinghouseovih aktivnosti, ali kao pozadine Teslinog herojskog doprinosa; i Nijemci tiho, ali samouvjereno primjećuju da su Michael Osipowitch von Dolivo-Dobrowolsky i njemačka tvrtka AEG predstavili motor u obliku koji se masovno koristio 1900. godine. Švedski se povjesničari prisjećaju Jonasa Wenströma, a Švicarci ističu rad Charlesa E. L. Browna iz tvrtke Brown, Boveri & Company. Francuzi skreću pozornost na Marcela Depreza, koji je doprinio razvoju koncepata AC polja i razvoju mnogih električnih uređaja. Očigledno su okolnosti koje su usmjerile pozornost na potrebu za asinkronim AC motorom bile transnacionalne. ... Kao najpoznatiji među izumiteljima asinkronog AC motora ističe se Nikola Tesla. Tesla je poznatiji od ostalih ne samo zbog uspjeha svog izuma, već i zbog toga što je njegova domovina, Jugoslavija, predano njegovala sjećanje na njega; jer je bio povezan s vodećim američkim industrijalcem; jer su ga njegovi suvremenici*

---

<sup>71</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 90.

<sup>72</sup> Isto, str. 91.

<sup>73</sup> V. F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, str. 415.

*poštovali; i zato što je bio živopisna, dramatična osoba koja je privukla značajnu pozornost u novinama i časopisima te o kojoj je napisan niz popularnih knjiga.*<sup>74</sup>

## 6. Transformatori

Transformator je nastao zahvaljujući tome što je Michael Faraday 1831. godine otkrio zakon elektromagnetske indukcije. Faradayev je eksperimentalni induksijski uređaj u svoj svojoj jednostavnosti bio u određenoj mjeri embrij iz kojeg su se razvili svi generatori, motori i transformatori. Taj je uređaj bio neka vrsta primitivnog impulsnog transformatora kod kojeg se otvarao i zatvarao DC krug. Međutim, bio je to uređaj s dva namota namotana na zatvorenu željeznu jezgru, tj. bio je to jednofazni pratransformatore sa zatvorenom željeznom jezgrom.

Amerikanac C. J. Page je 1836. godine otkrio princip rada autotransformatora tako što je prekidao istosmjernu struju na dijelu namota namotanog na otvorenu željeznu jezgru te je izazvao preskok električne iskre između dva priključka na ostatku namota<sup>75</sup>

Prva vrsta transformatora, uređaja koji prenosi električnu energiju iz jednog strujnog kruga u drugi pomoću elektromagnetske indukcije, bio je tzv. induktor ili induksijska zavojnica. Induktor je uređaj pomoću kojeg se niskonaponska istosmjerna struja pomoću prekidača pretvara u simuliranu izmjeničnu struju te se preko elektromagnetske indukcije u drugom namotu sa znatno većim brojem zavoja postiže visoki napon. Prekidač može biti mehanički, elektromehanički ili elektronički. Naravno, na samom početku prekidači su bili mehanički. U Europi je prvi induktor bio Callanov induktor, ali je mnogo poznatiji postao Rühmkorffov induktor. Irski je svećenik i istraživač Nicholas Callan svoj induktor opisao 1836. godine te ga je konstruirao 1837. godine, dok je njemački konstruktor instrumenata Heinrich Daniel Rühmkorff svoj induktor konstruirao 1848. godine.<sup>76</sup>

Da bi pojačao iskrenje iz induktora, Cromwell Fleetwood Varley je 1856. godine kroz primarni namot puštao simuliranu izmjeničnu struju, koju je dobivao iz DC izvora pomoću preklopke. Budući da su 1868. godine postojali stabilni izvori jednofaznog AC napona, induktori su se mogli koristiti izravno, tj. bez mehaničkog prekidača. To je prvi učinio engleski fizičar William Robert Grove 1868. godine. Sljedeće godine prihvaćeni su brojni patentni za korištenje induktora

---

<sup>74</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 110-112.

<sup>75</sup> A. A. Halacsy, G. H. von Fuchs, *Transformer Invented 75 Years Ago*, 1961., str. 404-407.

<sup>76</sup> F. Uppenborn, *History of the Transformer*, 1889., str. 1-13.

s dva namota koji su bili namotani na otvorenu željeznu jezgru.<sup>77</sup>

Možda bi malo poznati američki izumitelj Jim Billings Fuller bio izumitelj transformatora i prijenosnog AC sustava da nije prerano umro. Svoje je ideje povjerio svom predradniku neposredno prije smrti, a njegove su bilješke pronađene nedugo nakon toga, u veljači 1879. godine. Njegove ideje u to vrijeme nisu bile prepoznate i, naravno, nisu bile iskorištene u praksi. Predložio je korištenje zatvorene željezne jezgre i paralelno povezivanje primarnih namota transformatora, a ne serijsko povezivanje kao što je to tada činila većina eksperimentatora.<sup>78</sup>

Ruski istraživač Pavel Nikolajevič Jabločkov je u Parizu 1876. godine patentirao i 1877. godine instalirao novi sustav lučne rasvjete, koji je koristio induktore napajane iz jednofaznog izmjeničnog izvora – dinama (DC generatora) s izmjenjivačem i potom iz Grammeovog jednofaznog AC generatora. To je bila prva električna ulična rasvjeta. Jabločkov je, ustvari, za napajanje koristio strujnu petlju, a to znači da su primarni namoti induktora bili povezani serijski. Preko sekundarnog namota jednog induktora napajana je jedna svjetiljka ili samo nekoliko svjetiljki. Ako se pokvari jedna svjetiljka, onda ne svijetle samo s njom serijski povezane svjetiljke.<sup>79</sup>

Dana 13. rujna 1882. francuski inženjer Lucien Gaulard i engleski poduzetnik John Dixon Gibbs podnijeli su zahtjev za engleski patent br. 4362 za jednofazne transformatore i za prijenosni električni sustav čije su sastavnice bili ti transformatori. Taj su sustav demonstrirali najprije 1883. godine na maloj elektrotehničkoj izložbi u Westminster Aquariumu u Londonu, zatim na Metropolitan Railwayu u Londonu iste godine, te na Općoj talijanskoj izložbi u Torinu, u Italiji, 1884. godine. Gaulard-Gibbsov transformator nastao je preinakom induktora i to je bio silazni jednofazni transformator s otvorenom ravnom jezgrom, a oni su ga nazvali *sekundarnim generatorom*. Tada nije postojao naziv transformator. Oni su inzistirali na upotrebi otvorene željezne jezgre, a napon na sekundaru njihova transformatora kontrolirao se guranjem i izvlačenjem ove jezgre. Bilo je čudno i kontraproduktivno to što su oni inzistirali na serijskom povezivanju primara svojih transformatora, iako je Maxwell još 1865. godine dokazao da se sekundarni naponi ne mogu samostalno kontrolirati ako su primarni namoti spojeni serijski.<sup>80</sup>

Prvi koji je u Europi ukazao na nedostatke serijskog povezivanja Gaulard-Gibbsovih jednofaznih transformatora bio je Rankin Kennedy. Te je nedostatke opisao u svom članku objavljenom u časopisu *Electrical Review* od 9. lipnja 1883. godine. Na kraju ovog članka nalazimo zanimljivu tvrdnju da

---

<sup>77</sup> A. A. Halacsy, G. H. von Fuchs, *Transformer Invented 75 Years Ago*, 1961., str. 404.

<sup>78</sup> Isto, str. 404.

<sup>79</sup> F. Uppenborn, *History of the Transformer*, 1889., str. 13-15.

<sup>80</sup> A. A. Halacsy, G. H. von Fuchs, *Transformer Invented 75 Years Ago*, 1961., str. 404.

transformatori, kada nisu u primarnom krugu spojeni serijski, kao što je to bilo uobičajeno dotad, u paralelnom spoju imaju samoregulatorajući sustav raspodjele struje. Rankin Kennedy to izražava sljedećim riječima: „*Međutim, u paralelnom radu, sekundarni generator je prekrasan samoregulatorajući distribucijski sustav.*“<sup>81</sup>

Bila je velika sreća to što su izložbu u Torinu 1884. godine posjetila tri mlada inženjera, Miksa Déri, Ottó Titusz Bláthy i Károly Zipernowsky, iz elektroodjela mađarske tvrtke Ganz iz Budimpešte. Prepoznali su veliki nedostatak otvorene željezne jezgre i serijskog povezivanja primarnih namota Gaulard-Gibbsovog transformatora. Zanimljivo je istaknuti da je Bláthy upitao Gaularda zašto ne koristi zatvorenu željeznu jezgru, a ovaj je odgovorio da bi to bilo štetno i neekonomično. Vrativši se kući, počeli su raditi na nekim poboljšanjima Gaulard-Gibbsovog transformatora, a u laboratorijskom časopisu tvrtke Ganz od 7. kolovoza 1884. godine objavljene su prve pisane bilješke o njihovim eksperimentima sa zatvorenom željeznom jezgrom. Tijekom zime 1884. godine, Déri je demonstrirao njihov izum jednofaznog transformatora sa zatvorenom željeznom jezgrom u Austriji na Vienna Trade Associationu. Njihovi eksperimenti rezultirali su s dva austrijska patentna podnesena u siječnju i veljači 1885. godine. Još četiri transformatora ovog tipa proizvedena su tijekom 1884. godine. Dva su bila za vlastitu tvornicu, jedan za mlin brašna Arpadmalom u Budimpešti i jedan za ruski Sevastopolj. Svoj transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom i AC prijenosni sustav predstavili su na Nacionalnoj općoj izložbi u Budimpešti u svibnju 1885. godine. Za napajanje je korišten jednofazni AC generator napona 1,35 kV i frekvencije 70 Hz. Napon generatora transformiran je pomoću 75 ogrnutih transformatora na napon 1.067 Edisonovih žarulja sa žarnom niti, koje su osvijetljavale izložbu. Tada je transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom, paralelno spojen na AC izvor, postao stvarnost. Ovaj uređaj, koji su Déri, Bláthy i Zipernowsky prvi nazvali **transformatorom**, bio je veliko unaprjeđenje u odnosu na induktore koji su proizvodili iskre i u odnosu na Gaulard-Gibbsov transformator s otvorenom željeznom jezgrom (sekundarni generator). Transformator tvrtke Ganz u literaturi se naziva ZBD transformatorom ili pak ZDB transformatorom, što su inicijali prezimena njegovih izumitelja. Sustav u kojem su primarni namoti ovih transformatora bili spojeni paralelno omogućio je da regulacija opterećenja transformatora bude neovisna o opterećenju ostalih transformatora, što je omogućilo učinkovit prijenos električne energije kroz transformatore. Zatvorena željezna jezgra smanjila je na praktične iznose struju magnetiziranja, reaktanciju, gubitke u bakru, temperaturu namota te je pojednostavnila regulaciju sekundarnog napona i povećala učinkovitost. Bez zatvorenog magnetskog kruga transformatora i njihovog paralelnog rada danas ne bismo imali AC prijenos električne energije,

---

<sup>81</sup> F. Uppenborn, *History of the Transformer*, 1889., str. 38.

kao što ne bismo imali ni proizvodnju električne energije bez izuma električnog generatora.<sup>82</sup> Dakle, ovaj izum transformatora sa zatvorenom željeznom jezgrom omogućio je opću elektrifikaciju svijeta, kao jedna od važnih sastavnica današnjeg elektroenergetskog sustava. Tvrtka Ganz je proizvela dva tipa ZBD transformatora: ogrnuti i jezgrasti.<sup>83</sup>

Gaulard i Gibbs su svoja patentna prava prodali američkoj tvrtki Westinghouse, a njihov dizajn jednofaznog transformatora s otvorenom željeznom jezgrom poboljšao je elektroinženjer William Stanley. Ustvari, Stanley je konstruirao prvi Westinghouseov komercijalni jednofazni transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom ogrnutog tipa 1885. godine, za koji mu je patent prihvaćen 1886. godine.<sup>84</sup> Stanley je imao pristup patentima i tehničkoj literaturi o sustavima Gaularda i Gibbsa te ZBD sustavima. Prema Cooperu, lukavi poduzetnik Westinghouse je zadužio svog elektroinženjera Stanleyja da unaprijedi Gaulard-Gibbsov sustav tek toliko da može biti patentiran te da tako izbjegne dugotrajnu sudsku bitku s Edisonom, jer se nagađalo da je Edison kupio licencu za ZBD dizajn tvrtke Ganz i to samo radi blokiranja konkurenata na području razvoja AC sustava.<sup>85</sup>

Prvi patenti prijavljeni u SAD-u za jednofazne transformatore sa zatvorenom željeznom jezgrom bili su sljedeći: patent br. 352.105 dana 7. svibnja 1885. godine - Zipernowsky, Déri, Bláthy; patent br. 349.612 dana 23. studenog 1885. godine - W. Stanley; patent br. 342.553 dana 26. veljače 1886. godine - Westinghouse; patent br. 351.589 dana 6. ožujka 1886. godine - L. Gaulard i J. D. Gibbs; i patent br. 360.198 dana 11. listopada 1886. godine - Bláthy.<sup>86</sup>

Glavni elektroinženjer njemačke tvrtke AEG Michael von Dolivo-Dobrowolsky je 1889. godine konstruirao prvi trofazni suhi transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom. Iduće godine potpisan je licencni ugovor između njemačke tvrtke AEG i švicarske tvrtke Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) iz Züricha radi razvoja trofaznih AC sustava. Glavni elektroinženjer tvrtke MFO bio je Švicarac Charles E. L. Brown. Prema tom ugovoru, MFO je AEG-u trebao platiti umjerenu naknadu za svaku konjsku snagu instaliranih trofaznih sustava. U vrijeme potpisivanja ovog ugovora, MFO još nije bio izradio nijedan trofazni AC motor niti je na tome započeo radove.<sup>87</sup> Zahvaljujući suradnji ovih dviju tvrtki, već je 1890. godine bio završen MFO-ov projekt izrade trofaznog uljnog

---

<sup>82</sup> A. A. Halacsy, G. H. von Fuchs, *Transformer Invented 75 Years Ago*, 1961., str. 405.

<sup>83</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 771.

<sup>84</sup> Isto, str. 771.

<sup>85</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 36.

<sup>86</sup> A. A. Halacsy, G. H. von Fuchs, *Transformer Invented 75 Years Ago*, 1961., str. 407.

<sup>87</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 419.

transformatora.<sup>88</sup> U SAD-u nije zaživjela ideja da se grade trofazni transformatori, već se tamo umjesto trofaznog uljnog transformatora i danas koristi skup od tri jednofazna uljna transformatora.

Tvrtka Ganz nije bila pionir u razvoju trofazne AC tehnologije. Ona je svoj prvi trofazni transformator konstruirala tek 1895. godine, a konstruirao ga je Ottó Titusz Bláthy, što je potaklo novi tehnički i gospodarski procvat mađarske elektroprivrede.<sup>89</sup>

## 7. Jednofazni AC prijenosni sustavi

Članak u *Electrical Worldu* iz 1922. godine opisao je Thomasa Alvu Edisona kao oca elektroindustrije. Edisonov izum praktične električne rasvjete sa žarnom niti 1879. godine bio je pokretačka snaga za uspjeh Edisonovih komercijalnih niskonaponskih DC prijenosnih sustava kratkog dometa u SAD-u i drugdje, počevši od 1882. godine. Međutim, 1886. godine AC prijenosni visokonaponski sustavi tvrtke Ganz iz Budimpešte počeli su se natjecati s Edisonovim DC sustavima u Europi, a AC sustavi tvrtke Westinghouse Electric Company počeli su se natjecati s Edisonovim DC sustavima u SAD-u. Edison je reagirao posegnuvši za politikom. Edison je vodio tzv. rat struja protiv Georgea Westinghousea u obrani svojih DC elektroenergetskih sustava putem javne kampanje za stvaranje percepcije da je visoki AC napon opasan po život i zdravlje ljudi. Ipak, u tom je razdoblju postojao stalni rast broja izvedbi Westinghouseovih sustava. Edisonovi verbalni napadi postali su nevažni 1889. godine kada su ga financijeri prisilili da spoji sve svoje elektrotvrtke u jednu, Edison General Electric Company, a u toj novoj tvrtki kontrolu je imao financijer Henry Villard. Epidemija knjiga s detaljima o tzv. ratu struja započela je tek 1996. godine. Očito postoji veliko tržište knjiga o ratu struja, koji uključuje Edisona, Teslu i Westinghousea.<sup>90</sup> U nedostatku Edisonovog monumentalnog ugleda i konzervativnog utjecaja, dogmatsko protivljenje izmjeničnoj struji tvrtke Edison General Electric je splasnulo. Edisonovo povlačenje s rukovodeće pozicije otvorilo je put spajanju njegove tvrtke s tvrtkom Thomson-Houston Company, rastućim proizvođačem električnih strojeva, koja je proizvodila opremu za DC sustave i jednofazne AC sustave.<sup>91</sup>

---

<sup>88</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 90-94.

<sup>89</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 203.

<sup>90</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 768.

<sup>91</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 125-126.



Ustvari, nikakvog pravog rata struja nije ni bilo, već je nova AC tehnologija istisnula staru DC tehnologiju. To je bila borba moćnih industrijalaca Thomasa Alve Edisona i Georgea Westinghousea za elektrotržište, a izumitelj Nikola Tesla u toj je borbi bio gotovo nevažan jer je prethodno tvrtki Westinghouse prodao patentna prava na svoje izume. Međutim, mediji su tobožnju borbu usamljenog genija Nikole Tesle s moćnim i zlim neprijateljem Edisonom učinili vrlo tiražnom.

Reverzibilnosti električnog generatora i motora sadržano je u Lenzovom zakonu otkrivenom 1833. godine, koji je sam Heinrich Friedrich Emil Lenz nazvao „zakonom uzajamnosti magnetoelektričnih i elektromagnetskih pojava”. To je otkriće vrlo brzo postalo općepoznato među fizičarima, osobito nakon što je Lenz 1838. godine detaljno opisao svoje pokuse u kojima je Pixiijev jednofazni AC generator koristio kao DC motor tako što ga je opremio komutatorom i njegov namot spojio na DC izvor.<sup>92</sup> Francuski elektroinženjer Hippolyte Fontaine, zaposlenik u Grammeovoj tvrtki, je 1873. godine iskoristio tu mogućnost da se DC generator može koristiti kao DC motor te je između dva Grammeova DC generatora povezana električnim kabelom prenio električnu energiju, gdje je jedan DC generator radio kao DC motor. Taj je prvi poznati prijenos električne energije bio prikazan na Svjetskoj izložbi u Beču 1873. godine. Sve do tada upotreba elektromotora bila je ograničena jer se vjerovalo da ih je moguće pogoniti samo električnom energijom iz skupih baterija. Međutim, Fontaine je dokazao da ih je moguće napajati i iz DC generatora.<sup>93</sup>

Tijekom 80-ih godina 19. stoljeća izumitelji i inženjeri stalno su poboljšavali generatore, motore i druge komponente DC sustava. Problemi DC sustava uspješno su se rješavali, uz jednu iznimku, a to su bili visoki troškovi distribucije, osobito prijenos na daljinu. Edison je identificirao troškove distribucije električne energije žicom ili kabelom kao veliku slabu točku u sustavu koji je projektirao. Troškovi distribucije postali su približno isti kao i troškovi proizvodnje i značajno su se povećali 1880-ih godina kada je radijus distribucije s DC elektrane narastao na više od kilometra. Većina inženjera i upravitelja elektrana nije vjerovala da je DC „prijenos” na daljinu (za razliku od „distribucije” na kratke udaljenosti) izvediv bez pohrane električne energije.<sup>94</sup>

U SAD-u i mnogim drugim zemljama, visokonaponski prijenos električne energije na velike udaljenosti započeo je tek s AC sustavima za koje su razvijeni uzlazni i silazni transformatori. Međutim, visokonaponski DC prijenosni sustavi natjecali su se s AC prijenosnim sustavima u nekim europskim zemljama. Prva demonstracija prijenosa DC električne energije na velike udaljenosti dogodila se

---

<sup>92</sup> O. Mahr, *Die Entstehung der Dynamomaschine*, 1941., str. 52.

<sup>93</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014., str. 53.

<sup>94</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 83.

u Njemačkoj 1882. godine na Međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi održanoj u Münchenu. Sustav je dizajnirao francuski elektroinženjer Marcel Deprez. Vod je bio dug 57 kilometara, DC napon izvora bio je 2,2 kV, a promjer vodiča 4,5 mm. Vod se protezao od Miesbacha do elektrotehničke izložbe u Münchenu, gdje je DC motor pokretao centrifugalnu pumpu koja je napajala mali umjetni vodopad. U nedostatku uređaja za pretvaranje DC napona, komercijalno održiva metoda za prijenos istosmjerne struje na velike udaljenosti, koju je izumio švicarski inženjer René Thury, koristila je serijski povezani DC generator u elektrani i DC motore na mjestu potrošnje kao djelatelje napona. Tvrtka Società per l'Acquedotto De Ferrari Galliera iz Genove montirala je prvi Thuryjev sustav 1889. godine. Snaga sustava bila je 940 kW, DC napon 14 kV, a električna energija je u Genovu stizala iz hidroelektrane udaljene 60 kilometara. Najpoznatiji Thuryjev sustav, od Moutiersa do Lyona u Francuskoj, koji je premostio udaljenost od 180 km, počeo je 1906. godine davati 4,7 MW snage na DC naponu 57 kV. Taj je sustav još uvijek radio početkom 1936. godine. Veliki nedostaci Thuryjeva sustava isporuke DC energije s promjenjivim naponom i konstantnom strujom onemogućili su njegovu daljnju upotrebu.<sup>95</sup>

Od velike je važnosti za povijest elektrifikacije već spomenuti jednofazni AC prijenosni sustav Luciena Gaularda i Johna Dixona Gibbsa. Opis njihovog sustava objavljen je u Velikoj Britaniji 1883. godine. Gaulard i Gibbs prodali su ekskluzivna prava na svoje izume novoj tvrtki, National Company for the Distribution of Electricity by Secondary Generators iz Londona. Nekoliko Gaulard-Gibbsovih sustava izvedeno je u Velikoj Britaniji, Francuskoj, Njemačkoj i Italiji od 1883. do 1886. godine. Jednofazni transformatori s otvorenom željeznom jezgrom („sekundarni generatori”) bili su serijski povezani na primarnoj strani, a svjetiljke su bile spojene paralelno na sekundarnoj strani svakog pojedinog transformatora, a napon na svjetiljkama je bio nestabilan jer su se napon i snaga na pojedinoj svjetiljci povećavali ili padali s promjenom ukupnog broja svjetiljki u sustavu. Proizvodnja ovih sustava je obustavljena 1887. godine.<sup>96</sup>

Godine 1884. na Općoj talijanskoj izložbi u Torinu prikazan je eksperimentalni Gaulard-Gibbsov AC prijenosni sustav napona 3 kV od Lanza do Torina. Ovaj je sustav prenosio električnu energiju na udaljenost od 40 kilometara i bio je prvi AC prijenosni sustav koji je javno predstavljen. Sustav je osvijetljivao izložbene zgrade, željeznički kolodvor u Torinu te postaje u Veneria Realeu i u Lanzu, malom selu u Savojskim Alpama. Za svoj pokazni AC prijenosni sustav u Torinu, Gaulard i Gibbs nagrađeni su velikom nagradom od 10 tisuća franaka. Uslijedili su trajni AC prijenosni sustavi 1885. i 1886. godine

---

<sup>95</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 769.

<sup>96</sup> Isto, 770.

u francuskom Toursu, talijanskom Rimu i njemačkom Aschersleбенu, a njihov najpoznatiji jednofazni AC prijenosni sustav započeo je s radom u galeriji Grosvenor u Londonu u ožujku 1885. godine.<sup>97</sup>

Gaulard-Gibbsov jednofazni AC prijenosni sustav nije bio učinkovit. Prije 1885. godine, otkrivena je velika mana tog sustava. Gaulard i Gibbs očekivali su da će konstantna primarna struja rezultirati konstantnim sekundarnim naponom, što se pokazalo pogrešnim. Ako je opterećenje sekundarnog namota transformatora variralo, kao, na primjer, kada se isključi dio žarulja sa žarnom niti, preostale svjetiljke postale bi svjetlije. Kako bi to riješili, Gaulard i Gibbs su dodali u sekundarni krug automatski regulator dizajniran za promjenu sekundarne struje u skladu s opterećenjem i za održavanje konstantnog sekundarnog napona. Bez obzira na uspjeh tog regulatora, dodana je još jedna komplikacija ionako iznimno kompliciranom dizajnu transformatora. Krajem 1885. godine, ili pak početkom 1886. godine, Gaulard i Gibbs isprobali su kombinaciju paralelno povezanih primarnih namota transformatora i zatvorene željezne jezgre tih transformatora. Rečeno im je da će ova kombinacija osigurati dobru regulaciju napona, ali ovaj sustav nije funkcionirao na zadovoljavajući način. Vjerojatno su njegove sastavnice zahtijevale više redizajniranja, nego što su oni mogli sebi priuštiti ili bili sposobni učiniti. Na kraju, čini se da je regulacija napona bila glavna slaba točka u njihovu sustavu. Pribjegli su izuzetno složenim uređajima za regulaciju sekundarnog napona u slučaju promjenjivog opterećenja, ali nisu uspjeli riješiti problem, a odgovor su pronašli drugi izumitelji i drugi inženjeri. Međutim, Gaulard-Gibsov je AC prijenosni sustav imao velikog utjecaja na daljnji razvoj AC prijenosnih sustava. On je potakao profesora Galilea Ferrarisa na rad na razvoju AC sustava i izumu AC motora, Georgea Westinghousea da osnuje elektrotvrtku 1886. godine kao i Williama Stanleya da za tvrtku Westinghouse razvije jednofazni AC prijenosni sustav. Naravno, to je potaklo i mađarsku tvrtku Ganz da razvije svoj tzv. ZBD jednofazni AC prijenosni sustav. O tome William Stanley kaže: „Iako, dakle, rad Goularda i Gibbsa nije rezultirao izradom nijednog komercijalnog sustava, zahvalni smo im na interesu koji su pobudili za mogućnosti korištenja izmjenične struje, jer su nedvojbeno skrenuli pozornost na ovu granu elektrotehnike.”<sup>98</sup>

Tvrtka Ganz iz Budimpešte prikazala je eksperimentalnu verziju ZBD prijenosnog jednofaznog AC sustava na Nacionalnoj općoj izložbi u Budimpešti 1885. godine, čiji su tvorci bili Károly Zipernowsky, Ottó Titusz Bláthy i Miksa Déri. Za razliku od Gaulard-Gibbsovog jednofaznog prijenosnog AC sustava, ZBD sustav je bio komercijalno praktičan i masovno se koristio. U ZBD sustavu, primarni namoti ZBD transformatora sa zatvorenom željeznom jezgrom bili su

---

<sup>97</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 94.

<sup>98</sup> W. Stanley, *Alternating-Current Development in America*, 1912., str. 564.

paralelno spojeni na jednofazni AC izvor, a na sekundarnoj strani transformatora svjetiljke su, također, bile spojene paralelno tako da opterećenje ne utječe značajno na napon trošila.

Tvrtka Ganz je još za vrijeme izložbe u Budimpešti, u rujnu 1885. godine, dobila narudžbu iz Švicarske za isporuku prve jednofazne AC rasvjetne opreme, koja je uključivala i ZBD transformatore. U prvom koraku dva jednofazna, dvadesetpolna, 42 Hz, samouzbudna (SW) generatora, brzine vrtnje 250 o/min, nazivnog napona 2 kV, isporučena su za malu hidroelektranu koja je koristila energiju vodopada u blizini Littaua. Električna energija se dalekovodima prenosila do potrošača (mlinova, sela, hotela u Luzernu). Tisuće žarulja se napajalo električnom energijom na naponu od 30 V preko odgovarajućeg broja jednofaznih silaznih ZBD transformatora snage 7 kVA.<sup>99</sup>

Druga narudžba je, također, stigla u tvrtku Ganz tijekom Nacionalne opće izložbe u Budimpešti od tvrtke Società Generale Italiana di Eletticità Sistema Edison. Na temelju te narudžbe isporučena je elektrooprema za rasvjetu kazališta Teatro Dal Verme u Milanu, koje se dotad osvjetljavalo iz Edisonove DC elektrane od 120 konjskih snaga, udaljene 1,5 km. Istosmjerna se struja nije mogla iz DC elektrane uspješno prenijeti do kazališta, pa je za opskrbu kazališta električnom energijom, na prijedlog profesora Colomba, predsjednika društva, uprava naručila dva jednofazna sinkrona AC generatora i ZBD transformatore od tvrtke Ganz.<sup>100</sup> To je bila prva Ganzova parna elektrana, a ujedno i drugi transformatorski rasvjetni sustav; na početku za nazivnu snagu od 2.100 KS, a kasnije je korišten i za rasvjetu nekih dijelova grada.<sup>101</sup>

Od velikog je značaja bio posjet talijanskog profesora Guglielma Menngarinija Nacionalnoj općoj izložbi u Budimpešti 1885. godine. Nakon njegovog pohvalnog izvještaja o ovoj izložbi, izvršni direktor rimske tvrtke za plinsku rasvjetu, otputovao je u Budimpeštu naručiti eksperimentalno jednofazno AC postrojenje za Rim. Sukladno narudžbi, tvrtka Ganz isporučila je eksperimentalno postrojenje s dva AC generatora i dva transformatora. Generatore su pokretale parni strojevi Sulzer snage 150 KS. Jednofazni sinkroni AC generatori bili su izravno spojeni s parnim strojevima, čiji je rotorski dio služio i kao zamašnjak parnog stroja. Ovaj je eksperimentalni sustav, izgrađen u rimskoj četvrti Cerchi, pušten u pogon 1886. godine. Taj je sustav opskrbljivao električnom energijom nekoliko trgova, parlament, zgradu pošte, kazalište, kavane i trgovine u Rimu. Tada su prvi put u svijetu dva jednofazna sinkrona AC generatora bila paralelno povezana. Godine 1888., u drugoj fazi izgradnje sustava

---

<sup>99</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 186.

<sup>100</sup> Isto, str. 186.

<sup>101</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 32.

u rimskoj četvrti Cerchi, dodana su još dva jednofazna sinkrona AC generatora, svaki izravno spojen na parni stroj od 600 KS. Tada su sva četiri generatora bila paralelno povezana. Problem regulacije napona generatora riješio je Ottó Titusz Bláthy izumivši automatski regulator napona.<sup>102</sup> Parne je strojeve proizvela strana tvornica strojeva prema nacrtu tvrtke Ganz. Napon od 2 kV se od četiri jednofazna, paralelno povezana, Ganzova AC generatora, prenosio podzemnim kabelima do gradskih transformatorskih stanica, gdje se napon pomoću ZBD transformatora snižavao na 150 V. Na rimskom kraju dalekovoda Tivoli - Rim, u trafostanici Porta Pia, bila su instalirana 32 ZBD transformatora od po 30 kVA, u to vrijeme smatrana transformatorima vrlo velike snage. Godine 1898. napon prijenosnog voda je udvostručen. Prije nego što je uveden Ganzov jednofazni AC sustav, grad Tivoli je već imao jednofaznu AC uličnu rasvjetu, koja je bila napajana preko serijski povezanih Gaulard-Gibbsovih jednofaznih transformatora s otvorenom željeznom jezgrom („sekundarnih generatora”).<sup>103</sup>

Između 1885. i 1890. godine tvrtka Ganz je diljem svijeta isporučila gotovo 60 kompletnih jednofaznih AC elektrana, a do kraja 19. stoljeća ukupno 300 AC elektrana. U početku su se u ovim elektranama koristili jednofazni AC sustavi, a kasnije trofazni i samo ponekad dvofazni AC sustavi. U početku su elektrane napajale samo električnu rasvjetu, a kasnije su napajale i druga trošila.<sup>104</sup> Nakon Nacionalne opće izložbe u Budimpešti 1885. godine, tijekom idućih pet godina, tvrtka Ganz je izgradila ukupno 273 električna postrojenja diljem svijeta, između ostalog u sljedećim velikim gradovima: Rim, Beč, Linz, Venecija, Firenca, Milano, Zürich, Dresden, Köln, Pariz, Lyon, Monte-Carlo, Amsterdam, Stockholm, Leicester, Beograd, Sofija, Istanbul, Moskva, Sankt Peterburg, Melbourne, Montevideo, Buenos Aires, Sao Paulo i Valparaiso.<sup>105</sup> Prvi Ganzov jednofazni AC prijenosni sustav u Austriju pušten je u pogon u Innsbrucku 1899. godine, a električnu su energiju proizvodila dva Ganzova jednofazna sinkrona AC hidrogenatora snage 100 kVA, napona 2 kV, brzine vrtnje 250 o/min.<sup>106</sup>

Njemačka tvrtka Helios je 1886. godine od tvrtke Ganz kupila proizvodna prava za ZBD prijenosni sustav i izgradila jednofaznu AC mrežu u Kölnu. Ovo je bio prvi jednofazni AC sustav izgrađen u Njemačkoj.<sup>107</sup> Osim tvrtke Helios, proizvodna prava od tvrtke Ganz kupile su i neke druge tvrtke, između ostalog sljedeće tvrtke: berlinska tvrtka Schwarzkopf, francuska tvrtka Schneider & Co.

---

<sup>102</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 186.

<sup>103</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 32.

<sup>104</sup> Isto, str. 32.

<sup>105</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 186.

<sup>106</sup> Isto, str. 192.

<sup>107</sup> Isto, str. 188.

iz Le Creusota, španjolska tvrtka Planas Flaquer iz Gerone te tvrtka Weizer Elektrizitätswerke (Franz Pichler & Co.) prethodnik današnje austrijske tvrtke ELIN.<sup>108</sup>

Tvrtka Ganz je 1892. godine izgradila najveću hidroelektranu tog vremena u Europi u Tivoliju, blizu Rima. Ovdje su 30-polni jednofazni sinkroni AC generatori od 330 kVA, nazivnog napona 5,1 kV, tipa A7, bili pogonjeni sa šest Girardovih vodnih turbina od 350 KS. Ukupna snaga elektrane bila je 1,98 MVA. Uzbudnike su pokretale male vodne turbine od 50 KS. Elektrane u Cerchiju i Tivoliju, udaljene 30 km jedna od druge, bile su prve u povijesti elektrotehnike u kojima su hidrogeneratori pogonjeni vodnim turbinama i generatori pogonjeni parnim strojevima radili paralelno.<sup>109</sup> To je bilo moguće jer je Bláthy 1891. godine dizajnirao automatski regulator vodne turbine, koji je omogućio paralelni rad termoelektrane u Cerchiju i hidroelektrane u Tivoliju.<sup>110</sup> Povezivanje hidroelektrane u Tivoliju s termoelektranom u rimskoj četvrti Cerchi bila je najuspješnija primjena transformatorskog sustava dotad. Električna energija iz hidrogeneratora napona 5,1 kV dopremana je preko 28 km dugog dalekovoda do Rima, gdje se pomoću silaznih transformatora reducirala na napon parne elektrane u iznosu od 2 kV. Ovo je bilo prvi slučaj da su se AC rasvjeta i DC željeznica napajale visokonaponskim vodovima iz iste elektrane, a generatori pogonjeni parnim strojevima i hidrogeneratori radili su sinkrono.<sup>111</sup>

ZBD transformatoru i ZBD prijenosnom sustavu tvrtke Ganz divio se, između ostalih, i američki izumitelj William Stanley koji je u svom članku iz 1912. godine napisao: „*Gledajući njihov rad s našeg sadašnjeg stajališta, možemo mu se samo diviti. ... Zapravo, oni su otkrili sustav izmjenične struje kakav sada koristimo. Njihovi transformatori izrađeni su sa zatvorenim magnetskim krugovima, bili su inteligentno dizajnirani i pravilno konstruirani. Da nije bio izveden prijenosni sustav u Great Barringtonu, i dalje bismo imali sustav iz Budimpešte bez bitnih izmjena. U listopadu 1885. godine Zipernowsky, Déri i Bláthy objavili su opis svog sustava u časopisu English Electrical Review. Drago mi je što mogu svjedočiti o radu ovih uglednih ljudi, posebno iz razloga što su Amerikanci bili skloni, po meni bezrazložno, odati veliko priznanje Gaulardovom i Gibbsovom sustavu, a Zipernowsky, Déri i Bláthy bi trebali tražiti pionirski udjel u razvoju AC sustava.*“<sup>112</sup> Međutim, američki povjesničar tehnologije Thomas P. Hughes ističe veliki značaj Gaulardovog i Gibbsovog doprinosa elektrifikaciji svijeta, odnosno njihovom rješenju problema prijenosa i

---

<sup>108</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 32.

<sup>109</sup> Isto, str. 32.

<sup>110</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 195.

<sup>111</sup> Isto, str. 198.

<sup>112</sup> W. Stanley, *Alternating-Current Development in America*, 1912., str. 564-565.

distribucije električne energije: „Edison je, valja se podsjetiti, identificirao troškove distribucije kao ključan problem prilikom izuma svog sustava. Početkom 1880-ih godina različiti izumitelji i inženjeri različito su definirali ključni problem u pokušaju da poboljšaju situaciju. Ono što je na kraju rezultiralo praktičnim rješenjem došlo je od Francuza koji je radio s Englezom u Londonu. Međutim, ni njihovi suvremenici niti povjesničari nisu Lucienu Gaulardu i Johnu D. Gibbsu odali priznanje koje zaslužuju. Njihova povijest jest povijest sudskih sporova, protutužbi za prvenstvo, frustrirajućih tehničkih problema i osobne tragedije. Više od bilo kojih drugih izumitelja, Francuz Lucien Gaulard i njegov britanski poslovni partner John D. Gibbs zaslužni su za niz izuma i unaprjeđenja što je kulminiralo tijekom rješavanja problema prijenosa i distribucije električne energije. Gaulard i Gibbs pokazali su da se pomoću izmjenične struje i transformatora mogu koristiti visoki naponi za ekonomičan prijenos električne energije, a niski napon za distribuciju na mjestu potrošnje.“<sup>113</sup> Britanski su sudovi poništili Gaulard-Gibbsov patent za jednofazni AC prijenosni sustav utemeljen na transformatoru s otvorenom željeznom jezgrom, a nakon toga je jedan od njegovih tvorca Lucien Gaulard, slomljen tim događajem, poludio i preminuo 1888. godine.<sup>114</sup>

Uspjesi jednofaznog AC prijenosnog sustava tvrtke Ganz na kraju su ušutkali skeptičare, koji su pribjegli drugim sredstvima. Da bi se osvojilo tržište izgubljeno zbog monopola tvrtke Ganz, patenti su osporavani u Njemačkoj, Engleskoj i SAD-u. Dugotrajne su patentne parnice rezultirale poništenjem patenta u Njemačkoj iz formalnih razloga, a u SAD-u je dodjela patenata onemogućena opstrukcijom. Unatoč činjenici da su Ganzovi izumitelji u tim državama imali prihvaćene svoje patente, nisu imali dovoljno ovlasti da u potpunosti zaštite svoja prava. S vremenom, posebice s istekom patenata, Ganzov se jednofazni AC prijenosni sustav počeo koristiti u cijelom svijetu.<sup>115</sup>

Gaulard-Gibbsov eksperimentalni jednofazni AC prijenosni sustav Torino-Lanzo iz 1884. godine, eksperimentalni ZBD prijenosni sustav predstavljen na Nacionalnoj općoj izložbi u Budimpešti 1885. godine i uspješno uvođenje komercijalnih ZBD sustava u Europi 1886. godine dali su Westinghouseu i Stanleyju poticaj za početak razvoja i masovnu izvedbu jednofaznih AC prijenosnih sustava u SAD-u. Stanleyev je sustav postao operativan u ožujku 1886. godine. Odbacio je nestabilni Gaulard-Gibbsov dizajn, koji je kupio Westinghouse, i izumio je svoj jednofazni AC generator, transformator i AC prijenosni sustav. Njegov je sustav koristio uzlazne i silazne transformatore

---

<sup>113</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 86.

<sup>114</sup> Isto, str. 94.

<sup>115</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 65.

ogrnutog tipa, ali drugačijeg dizajna od ZBD transformatora, s paralelno spojenim primarnim namotima i paralelno spojenim svjetiljkama na sekundaru, kao i ZBD sustav. U Stanleyjevim patentima i drugom objavljenom materijalu nema dovoljno podataka da bi se mogle procijeniti relativne prednosti Stanleyjevog i ZBD sustava. Stanleyjev sustav s kratkim prijenosnim vodom u Great Barringtonu prestao je s radom u lipnju 1886. godine. Međutim, eksperiment je bio dovoljno uspješan da uvjeri Westinghousea da započne proizvodnju i montažu velikog broja komercijalnih elektrana i jednofaznih AC prijenosnih sustava istog općeg dizajna.<sup>116</sup> Westinghouse je započeo komercijalnu proizvodnju i 1886. godine otpremio prvi proizvedeni komercijalni jednofazni AC sustav u Buffalo, grad u saveznoj državi New York, gdje ga je lokalno poduzeće pustilo u rad. To je bio prvi komercijalni jednofazni AC prijenosni sustav izgrađen u SAD-u. Njegovi su autori bili George Westinghouse, William Stanley i Oliver B. Shallenberger. Narudžbe za dvadeset pet jednofaznih AC postrojenja slijedile su u roku od nekoliko mjeseci. George Westinghouse i njegovi inženjeri značajno su doprinijeli razvoju transformatorskog sustava dobrim projektiranjem njegovih sastavnica, što je omogućilo njihovu ekonomičnu i masovnu proizvodnju. Da bi olakšao proizvodnju, Westinghouse je patentirao Stanleyjev dizajn transformatora.<sup>117</sup>

Do 1. rujna 1887. godine tvrtka Westinghouse Electric Company proizvela je i montirala 24 male jednofazne AC elektrane u SAD-u i jednu u Kanadi. Godine 1890. više od 300 jednofaznih AC elektrana širom svijeta koristilo je Westinghouseove jednofazne AC sustave. Prvi veliki Westinghouseov komercijalni jednofazni AC prijenos u SAD-u dogodio se 1890. godine, kada je tvrtka Willamette Falls Electric Company iz Portlanda u Oregonu prenijela električnu energiju od slapova rijeke Willamette do Portlanda, udaljenog 22 kilometra. Napajanje iz 4 kV Westinghouseovog generatora prelazilo je izravno na žicu promjera 5,2 mm, a napon na kraju voda bio je 3,3 kV i bio je na primarnoj strani narinut na deset silaznih transformatora povezanih serijski, koji su primarni napon od 330 V smanjivali na 110 V.<sup>118</sup> Na rijeci Willamette u Oregonu, između Oregon Cityja i West Lynna, leži najveći slap na sjeverozapadu Pacifika. Gotovo trideset i jedna tisuća kubičnih metara vode svake sekunde teče preko slapova Willamette. Godine 1888. osnovana je tvrtka Willamette Falls Electric Company (koja će postati Portland General Electric) kako bi pronašla način iskorištenja energije vodopada za proizvodnju električne energije. U početku je tvrtka koristila četiri DC generatora s turbinskim pogonom Edisonova dizajna za DC

---

<sup>116</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 771.

<sup>117</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 104.

<sup>118</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 772.



prijenos električne energije preko dalekovoda dugog 22 kilometra do Portlanda. U to vrijeme vod Willamette-Portland bio je najdulji DC vod u SAD-u. Nije prošlo niti godinu dana kada je elektrana u Willametteu uništena u poplavi. Umjesto obnove DC sustava, investitori tvrtke odlučili su se za AC napajanje i instalirati Westinghouseove eksperimentalne AC generatore. Ova se odluka može uzeti kao početak kraja Edisonovog DC prijenosnog sustava.<sup>119</sup>

U engleskom tehničkom časopisu *Telegraphic Journal and Electrical Review*, na 349. stranici 20. sveska časopisa, tiskanoj 15. travnja 1887. godine, autor teksta je lamentirao: „*Europskim elektrotehničarima i kapitalistima ne služi baš na čast to što su sve ideje i eksperimenti došli iz Europe ... a prepušteno je američkoj tvrtki da preuzme sustav i učini ga komercijalnim i praktičnim uspjehom, s kojim tvrtka Westinghouse sada posluje.*“<sup>120</sup>

Britanskom je elektroinženjeru Sebastianu Ziani de Ferrantiju 1882. godine prihvaćen njegov prvi patent za jednofazni izmjenični AC generator, a 1886. godine prihvaćena su mu dva patenta za jednofaznu AC distribuciju. Tvrtka osnovana 1882. godine proizvela je prvi AC generator prema njegovom dizajnu. U siječnju 1886. godine tvrtka Sir Coutts Lindsay & Co., koja je bila vlasnik Gaulard-Gibbsove elektrane u galeriji Grosvenor u Londonu, imenovala ga je inženjerom odgovornim za zamjenu Gaulard-Gibbsovog sustava praktičnijim sustavom. Nova elektrana, s dva generatora napona 2,4 kV, davala je električnu energiju malom dijelu Londona. Ferrantijevo imenovanje dovelo je do dugotrajnih parnica oko valjanosti njegovih patenata. Dana 26. kolovoza 1887. godine tvrtka Sir Coutts Lindsay & Co. reorganizirala se i preimenovala u London Electric Supply Corporation, Limited. Pod Ferrantijevim vodstvom, nova je tvrtka izgradila veliku jednofaznu AC elektranu u Deptfordu, koja je započela s radom 1888. godine, a davala je AC napon od 10 kV i imala je dovoljno snage za opskrbu električnom energijom svih dijelova onoga što se danas naziva Greater London.<sup>121</sup>

Njemačka tvrtka AEG je izgradila jedan od prvih njemačkih jednofaznih AC sustava u Bad Reichenhallu, koji je prenosio električnu energiju na udaljenost od dva kilometra. Pušten je u rad u travnju 1890. godine, ali je bio bez sekundarne distribucijske mreže. Dva generatora i transformatori od 100 kVA izrađeni su u tvrtki MFO. Kraljevskim bavarskim dužnosnicima bilo je zabranjeno prisustvovati ceremoniji otvaranja jer se napon od 2 kV u strojarnici ove AC elektrane činio nepredvidljivim rizikom! Svoj drugi jednofazni AC sustav tvrtka

---

<sup>119</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 39.

<sup>120</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 105.

<sup>121</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 772.

AEG je izgradila u Bavarskoj, točnije u Landsbergu, u proljeće 1890. godine.<sup>122</sup>

Kao početak komercijalne elektrifikacije u Hrvatskoj može se uzeti početak elektrifikacije riječke luke početkom 1891. godine.<sup>123</sup> Te je godine Mađarska elektroprivreda u Rijeci izgradila prvu jednofaznu AC elektranu na teritoriju današnje Republike Hrvatske, koja je napajala električnu rasvjetu riječke luke, a jednofazni sinkroni AC generator i uzбудnik (DC generator) isporučila je tvrtka Ganz.<sup>124</sup> Između 1891. i 1893. godine Lipót Stark, inženjer tvrtke Ganz, vodio je izgradnju mađarskih električnih postrojenja u tri brazilska grada. Nakon povratka kući pridonio je i elektrifikaciji Budimpešte, Egera, Pečuha i Rijeke.<sup>125</sup> Mađarska je elektroprivreda preuzela upravljanje elektranom u Rijeci 1895. godine.<sup>126</sup> Međutim, projekt prethodno navedene parne elektrane započeo 1891. godine u potpunosti je realiziran 1892. godine. U kotlovnici elektrane bila su tri parna stroja, svaki snage 120 KS, a u strojarnici tri jednofazna AC generatora snage 120 kVA, napona 2 kV. Generator je pokretao tri visokonaponska AC motora napona 2 kV, a električna rasvjeta i manji motori napajani su preko ukopno sedam jednofaznih Ganzovih ZBD transformatora. Postojali su i električni stupovi kratkog distribucijskog voda.<sup>127</sup> Ova je jednofazna AC elektrana zamijenila malu DC elektranu od 22 kW iz 1890. godine, koja je napajala samo rasvjetu kolodvora i luke.<sup>128</sup>

Prvi jednofazni AC prijenosni vod u Hrvatskoj izgrađen je 1895. godine od HE Krke (Jaruge 1) do Šibenika. Bio je to **dvostruki jednofazni AC vod** od HE Krke do Šibenika, dug 11 kilometara, koji je pušten je u pogon 28. kolovoza 1895. godine. Napon jednofaznog AC generatora, ujedno i napon voda, bio je 3 kV. To je bio prvi jednofazni AC prijenosni vod visokog napona, ako se ne računa, prethodno navedeni, mnogo kraći jednofazni AC prijenosni vod u Rijeci, napona 2 kV.<sup>129</sup> Nepobitni dokazi da je HE Krka (Jaruga 1) bila jednofazna AC elektrana, a ne dvofazna AC elektrana, bit će izneseni u sljedećem poglavlju. Uspio sam pronaći samo u monografiji Instituta za elektroprivredu iz 1984. godine istinitu tvrdnju da je HE Krka (Jaruga 1) bila jednofazna AC elektrana i to na stranici 12, ali se u istoj monografiji na stranici 146 pogrešno navodi da je generator te

---

<sup>122</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 95.

<sup>123</sup> B. Markovčić i dr., *Razvoj elektrifikacije Hrvatske – 1. dio – Od početka elektrifikacije do 1945. godine*, 1984., str. 11.

<sup>124</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 195.

<sup>125</sup> Isto, str. 196.

<sup>126</sup> Isto, str. 205.

<sup>127</sup> N. Palinić, *125 godina električne energije u Rijeci*, 2006., str. 54.

<sup>128</sup> B. Markovčić i dr., *Razvoj elektrifikacije Hrvatske – 1. dio – Od početka elektrifikacije do 1945. godine*, 1984., str. 11.

<sup>129</sup> Isto, str. 13.

elektrane bio dvofazni.<sup>130</sup> Međutim, u članku objavljenom u časopisu *Energija* 1995. godine na stranici 252 navodi se istinita tvrdnja da je struja iz generatora bila *dva puta jednofazna*.<sup>131</sup> U svojoj ostaloj korištenoj literaturi pronašao sam tvrdnju da je HE Krka (Jaruga 1) bila dvofazna AC elektrana, a ponegdje čak i potpuno neutemeljenu tvrdnju da je ovaj jednofazni AC sustav bio prvi cjeloviti višefazni elektroenergetski sustav na svijetu.<sup>132</sup> Međutim, ovaj AC sustav nije bio ni dvofazni ni prvi u svijetu.

U mnoštvu kontradiktornih podataka navedenih u literaturu vrlo često nije lako prepoznati pravu istinu. I sam sam, pod utjecajem korištene literature, u svom članku iz 2022. godine nehotično pogriješio navevši da je HE Krka (Jaruga 1) bila dvofazna AC elektrana.<sup>133</sup> Međutim, nakon što sam u međuvremenu došao do izvornih podataka o toj hidroelektrani, spoznao sam što je istinito. Sada mogu, bez ikakve sumnje, napisati da je HE Krka (Jaruga 1) bila jednofazna AC elektrana.

Dana 17. prosinca 1895. godine, nekoliko mjeseci nakon HE Krke, u Varaždinu je u pogon puštena javna jednofazna AC elektrana, koja je imala tri parna stroja od 70 KS i tri jednofazna AC generatora od 50 kVA, frekvencije 42 Hz.<sup>134</sup> Iz ove se elektrane napajala javna električna rasvjeta.

## 8. Jednofazna AC elektrana HE Krka (Jaruga 1)

HE Krka (kasnije preimenovana u HE Jaruga 1) izgrađene je na slapovima rijeke Krke, u blizini grada Šibenika. Investitor gradnje ovog sustava bila je tvrtka *Šupuk i Meichsner – Prva povlaštena električna centrala u Dalmaciji Krka*, sa sjedištem u Šibeniku. Vlasnici ove tvrtke bili su šibenski gradonačelnik Ante Šupuk i inženjer Vjekoslav pl. Meichsner.<sup>135</sup> Pretpostavlja se da je ideju o gradnji tog jednofaznog AC sustava dobio Marko Šupuk, sin gradonačelnika Šupuka nakon povratka s Međunarodne elektrotehničke izložbe u Frankfurtu 1891. godine. Ovaj je jednofazni AC prijenosni sustav pušten u pogon 28. kolovoza 1895. godine.

---

<sup>130</sup> Isto, str. 12 i str. 146.

<sup>131</sup> M. Kalea i dr., *Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj*, *Energija*, 1995., str. 252.

<sup>132</sup> N. Holjevac, I. Kuzle, *Prvi cjeloviti višefazni elektroenergetski sustav na svijetu – Krka Šibenik*, 2019., str. 162-174.

<sup>133</sup> S. Vujević, *Počeci razvoja elektrifikacije u Europi i Sjevernoj Americi*, 2022., str. 381-436.

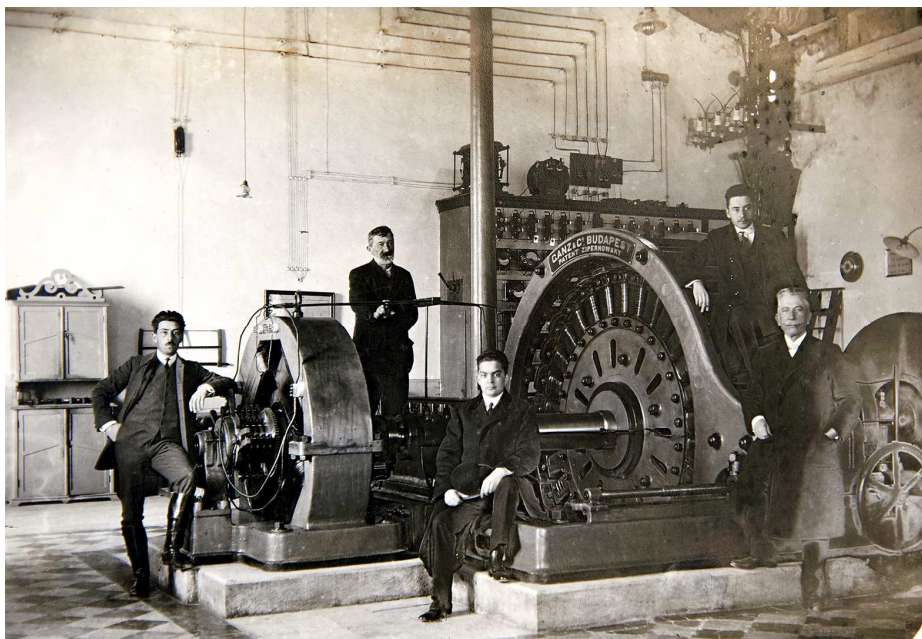
<sup>134</sup> J. Moser, *Šibensko munjivo – Crtime o izgradnji i korištenju prvog cjelovitog elektroprivrednog sustava u Hrvatskoj*, 1998., str. 22.

<sup>135</sup> Isto, str. 10-12.

| GRUNDBUCHBLATT                                                                                                 |                                                                          |                                                       |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| der <i>W. H. r</i> Maschine No <i>2289</i>                                                                     |                                                                          |                                                       |                                |
| Type: <i>A7</i>                                                                                                |                                                                          | Nähere Bezeichnung:                                   |                                |
| Direct mit dem Motor gekuppelt oder für Riemenantrieb mit oder ohne Riemenspannvorrichtung: <i>mit Turbine</i> |                                                                          |                                                       |                                |
| Leistung                                                                                                       | Ampères <i>67</i>                                                        | Riemscheibe                                           | Durchmesser: <i>Kuppelring</i> |
|                                                                                                                | Volt: <i>3000</i>                                                        |                                                       | Breite: <i>72 12337</i>        |
|                                                                                                                | Anzahl der zu betreibenden Glüh- und Bogenlampen event. Sec. Generatoren |                                                       | Bohrung: <i>200</i>            |
|                                                                                                                | Touren pro Minute: <i>170</i>                                            |                                                       |                                |
| Commutator                                                                                                     | Type und Zeichnung Nr. <i>9462</i>                                       | Bürsten                                               | Anzahl:                        |
|                                                                                                                | Durchmesser: <i>380</i>                                                  |                                                       | Material:                      |
|                                                                                                                | Breite: <i>86</i>                                                        |                                                       | Lagen in einer Bürste:         |
|                                                                                                                | Bohrung: <i>280/290</i>                                                  |                                                       | Länge:                         |
|                                                                                                                | Anzahl der Sektoren oder Schleifringe: <i>2</i>                          |                                                       | Breite:                        |
| Bohrung der Lager                                                                                              | Riemscheiben Seite: <i>210</i>                                           | Durchmesser des Drahtes der Bewickelung               | der Inductionsspulen:          |
|                                                                                                                | Commutator Seite: <i>150</i>                                             |                                                       | der Magnet-spulen bei S. W.    |
|                                                                                                                |                                                                          |                                                       |                                |
| Zeichnung Nr. (Zusammenstellung) nach welcher die Maschine montirt wurde: <i>7018. 8955</i>                    |                                                                          |                                                       |                                |
| Lieferung                                                                                                      | Datum: <i>7. XI. 94.</i>                                                 | Bemerkung:                                            |                                |
|                                                                                                                | Best.-Nr.: <i>71483</i>                                                  |                                                       |                                |
|                                                                                                                | Besteller: <i>Sebenico</i>                                               |                                                       |                                |
|                                                                                                                | Bestimmungsort:                                                          |                                                       |                                |
|                                                                                                                |                                                                          | Unterschrift<br>des Werkführers:      des Controlors: |                                |

100557 Cretzel & Deutsch, Budapest.

Sl. 6.: Preslika iz knjige isporuka tvrtke Ganz za generator tipa A7



Sl. 7.: Općepoznata fotografija članova obitelji Šupuk i suradnika pokraj jednofaznog AC generatora i DC uzбудnika HE Krke (Jaruge 1)

Vodna turbina HE Krke pokretala je **jednofazni** AC generator tvrtke Ganz. Generator je bio izravno spojen na dalekovod do Šibenika, dug 11 kilometara, s 360 stupova, s tri konzole. Prva je konzola bila s dva bakrena vodiča poprečnog presjeka  $35 \text{ mm}^2$ , a druga s dva vodiča poprečnog presjeka  $50 \text{ mm}^2$ . Treća je konzola prenosila telefonsku liniju za upravljanje od elektrane do vile inženjera Meichsnera. Razvod po Šibeniku sastojao se od dvije rasklopne stanice i šest transformatorskih stanica 3/0,11 kV. Sva elektrooprema elektrane, dalekovoda i razvoda po Šibeniku bila je djelo tvrtke Ganz iz Budimpešte, čiji su inženjeri i električari izveli montažu te puštanje u pogon. Potrošači su bili Šupukovi mlinovi, mlinovi drugih vlasnika, mala industrija te kazalište, hoteli i bolnica danju, a noću rasvjeta grada.<sup>136</sup>

Podaci o generatoru HE Krke (Jaruge 1), navedeni u literaturi, vrlo često su netočni pa i međusobno kontradiktorni. Stoga sam dr. sc. Gábora Nádora, zaposlenika tvrtke Ganz zamolio da mi pošalje presliku iz knjige isporuka tvrtke Ganz, iz 1894. godine, za generator HE Krke (Jaruge 1), koja se nalazi na Sl. 6 kao i presliku iz knjige isporuka za DC uzбудnik, koju nisam uvrstio u ovaj članak. Sa Sl. 6 se vidi da je generator HE Krke (Jaruge 1) bio tipa A7, a to je,

<sup>136</sup> Ž. Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, 2006., str. 34.

prema potpoglavlju 4.3, sigurno bio jednofazni sinkroni AC generator. Sa Sl. 4 i Sl. 7. vidi se da su generatori prikazani na ovim fotografijama istog tipa. Prema Sl. 6, jednofazni sinkroni AC generator je imao nazivni napon 3000 V, nazivnu struju 67 A i nazivnu brzinu vrtnje 170 o/min. To znači da mu je nazivna snaga bila 201 kVA, što se često tvornički zaokružuje na 200 kVA. Ovakvi su generatori bili građeni za frekvenciju od 42 Hz, pa izračun daje da generator treba imati 30 polova, što potvrđuje i Sl. 7. Prema preslici isporuke DC uzбудnika, koju mi je poslao dr. sc. Nádor Gábor, zaposlenik tvrtke Ganz, dana 21. prosinca 1894. godine za HE Krku (Jarugu 1) isporučen je DC uzбудnik tipa C8, nazivnog napona 180 V, nazivne struje 45 A i nazivne brzine vrtnje 170 o/min. To znači da mu je nazivna snaga bila 8,1 kW, što se često tvornički zaokružuje na 8 kW.

Za vodnu turbinu ugrađenu u HE Krku (Jarugu 1) nisam tražio izvorne podatke od tvrtke Ganz jer mi taj podatak nije od velike važnosti. U literaturi se navodi da je vodna turbina imala snagu 320 KS.<sup>137</sup> Taj je podatak u skladu s izvornim podacima jednofaznog AC generatora (Sl. 6) i DC uzбудnika.

Nakon što su 1897. godine Ante Šupuk i Meichsner prekinuli poslovnu suradnju, Meichsner je napustio njihovu zajedničku tvrtku, koja je promijenila ime u Ante Šupuk i sin. Tvrtka Ante Šupuk i sin je 1888. godine, ili pak 1889. godine, u HE Krku ugradila još jedan jednofazni AC agregat. Ovaj je drugi agregat napajao novoizgrađenu tvornicu za proizvodnju kalcijevog karbida u vlasništvu venecijanske elektrokemijske tvrtke. Tvornica je puštena u pogon u rujnu 1899. godine, ali je potpuno stradala u požaru iduće godine i nikad više nije obnovljena kao proizvodna jedinica.<sup>138</sup>

HE Krka (Jaruga 1) bila je u pogonu do 1914. godine, odnosno do početka Prvog svjetskog rata, kada su elektrana i njen dalekovod demontirani da bi se bakar i željezo iz elektrane i s dalekovoda upotrijebili u vojne svrhe.<sup>139</sup>

## 9. Višefazni AC prijenosni sustavi

Visokonaponski jednofazni AC prijenosni sustavi bili su sveprisutni do 1890. godine, osobito sustavi koje su izgradile tvrtka Westinghouse Electric Company iz SAD-a i tvrtka Ganz iz Mađarske. Tadašnji nedostatak zanimanja za višefazni prijenos električne energije prije Međunarodne elektrotehničke izložbe u Frankfurtu 1891. godine očit je i iz sadržaja Teslinog predavanja koje je održano u AIEE-u 16. svibnja 1888. godine. Predavanje je gotovo u potpunosti bilo o višefaznim AC motorima. Tesla nije niti spomenuo prednosti svog izuma

---

<sup>137</sup> Isto, str. 34.

<sup>138</sup> J. Moser, *Šibensko munjivo – Crnice o izgradnji i korištenju prvog cjelovitog elektroprivrednog sustava u Hrvatskoj*, 1998., str. 14.

<sup>139</sup> Isto, str. 16.

za prijenos električne energije opće namjene, iako je to učinio u patentu podnesenom 1887. godine, gdje je naveo da je njegov izum nova metoda ili način prijenosa energije pomoću električne struje, pri čemu se mnogi od postojećih problema rješavaju i osigurava se velika ekonomičnost i učinkovitost.<sup>140</sup>

U SAD-u je tvrtka Westinghouse ulagala u razvoj Teslinih višefaznih AC motora i višefaznog AC prijenosnog sustava. To ne čudi, s obzirom na to da je odnos tvrtke Westinghouse i Tesle bio sličan onom između Westinghousea i Williama Stanleyja. Oba slučaja pokazuju na koji su način tvrtke bile povezane s nezavisnim izumiteljima prije no što su postojali inženjerski razvojni odjeli i istraživačko-razvojni laboratoriji.<sup>141</sup>

Druge tvrtke u SAD-u i Njemačkoj, uključujući tvrtke Stanley Electric Manufacturing Company i Thomson-Houston Company, pridonijele su razvoju višefaznog AC sustava. Zanimljivo je da su Britanci stajali po strani. Jedan je britanski povjesničar napisao da su višefazni AC sustavi i asinkroni AC motor razvijeni u SAD-u i u Europi, ali da engleski inženjeri i tvrtke nisu obratili pažnju na to.<sup>142</sup>

Tzv. rat struja završio je bez dramatičnog uništenja jednog sustava drugim ili revolucionarnog prijelaza iz jedne paradigme u drugu. Sukob je razriješen tako što se počela koristiti kombinacija obaju sustava. Stoga je rat završio relativno blagom tranzicijom pri čemu je stariji sustav polako desetljećima gubio značaj, najprije kad ga je novi sustav nadopunjavao, a zatim kad ga je novi sustav u potpunosti zamijenio. Tehničko razrješenje olakšali su spojnici ili pretvarači, prvenstveno rotacijski pretvarač. Povijesti električne tehnologije rijetko daju uređajima mjesto koje zaslužuju. Budući da je rotacijski pretvarač bio rješenje kritičnog problema koji su definirali brojni izumitelji i inženjeri, i u ovom slučaju postoji istovremenost izuma. Slaba točka bila je ekonomsko-tehnička, a to je težnja za očuvanjem stečenih interesa u starom sustavu dok se ne prijeđe na novi. U SAD-u se izum rotacijskog pretvarača pripisuje Charlesu S. Bradleyju, koji je bio Edisonov zaposlenik prije no što je početkom 1890-ih godina u Yonkersu, u američkoj saveznoj državi New York, osnovao tvornicu za proizvodnju pretvarača, koji je izumio 1888. godine. Tvrtka General Electric je otkupila Bradleyjev patent i uređaje. Tvrtka Westinghouse Electric Company je, također, razvila svoje rotacijske pretvarače. Godine 1891. Wilhelm Lahmeyer, izumitelj različitih DC strojeva, predstavio je jednoarmaturni rotacijski pretvarač za pretvaranje istosmjerne struje u višefaznu i obrnuto. Haselwander, čiji je višefazni sustav kupila Lahmeyerova tvrtka, također, je patentirao rotacijski

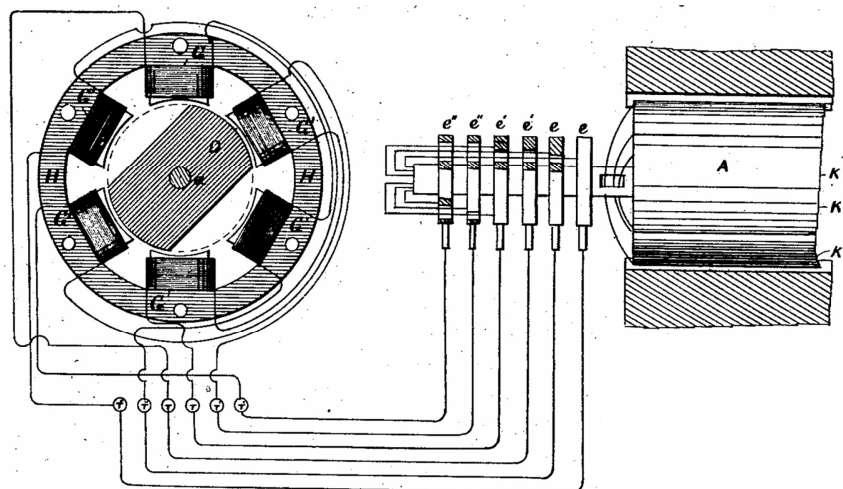
---

<sup>140</sup> A. Allerhand, *The Earliest Years of Three-Phase Power – 1891-1893*, 2020., str. 215.

<sup>141</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 119.

<sup>142</sup> Isto, str. 120.

pretvarač. Zipernowsky i Déri iz tvrtke Ganz ishodili su njemački patent za svoj rotacijski pretvarač. U povijesti rotacijskog pretvarača zabilježeni su i drugi nazivi za taj uređaj.<sup>143</sup>



Sl. 8.: Trofazni AC prijenosni sustav - trofazni sinkroni AC generator i trofazni sinkroni AC motor iz Teslinog američkog patenta br. 382.280

Kao što je prethodno rečeno, američki izumitelj Charles S. Bradley je 1887. godine prvi prijavio patent za dvofazni prijenos izmjenične električne struje s četiri vodiča, pola godine prije prijave najpoznatijih Teslinih američkih patenata prihvaćenih 1. svibnja 1888. godine, a patentne prijave za AC generatore, AC motore i prijenos električne energije Tesla je podnio krajem 1887. godine. Teslin dvofazni AC prijenosni sustav s četiri vodiča, iz američkog patenta br. 382.280, prikazan je na Sl. 3, dok je trofazni AC prijenosni sustav sa šest vodiča, iz istog patenta, prikazan na Sl. 8. U tim Teslinim patentima prihvaćenim 1. svibnja 1888. godine, Tesla je dvofazni sustav imao četiri vodiča, a trofazni sustav šest vodiča, tj. dva vodiča po fazi. Tek se u Teslinom američkom patentu br. 390.414, prijavljenom u travnju 1888. godine i prihvaćenom u listopadu 1888. godine, usput pojavio i trofazni AC prijenosni sustav bez transformatora. U opisu patenta Tesla navodi da postoji još jedna poznata vrsta DC strojeva s tri ili više armaturnih zavojnica sa zajedničkom neutralnom točkom, pri čemu su slobodni krajevi zavojnica spojeni na segmente komutatora. Pripadna shema trofaznog prijenosa s tri vodiča odnosi se na prijenos električne energije između trofaznog AC generatora i trofaznog AC motora, koji su nastali preinakom ovih DC strojeva (trosegmentni komutatori su zamijenjeni s po tri klizna prstena), a namoti

<sup>143</sup> Isto, str. 121.



novonastalih AC strojeva bili su spojeni u zvijezdu. To je upravo ono što je mjesec dana prije prijave ovog Teslinog patenta demonstrirao August Haselwander.<sup>144</sup>

Nijedan zapis o razvoju višefaznih AC sustava ne bi bio potpun bez osvrta na Međunarodnu elektrotehničku izložbu u Frankfurtu na Majni u ljeto 1891. godine. Iako je to nominalno bila međunarodna izložba, izlagači su bili uglavnom njemačke tvrtke. Izložci koji su pobudili najveći interes bili su višefazni AC uređaji koje su izložile mnoge tvrtke. Službeni izvještaj daje mnoge njihove ilustracije, zajedno s testovima koje je tijekom nekoliko mjeseci provodilo ispitno povjerenstvo.<sup>145</sup> Međutim, ono najvažnije što se dogodilo na toj izložbi jest to da su tamo prvi put javno prikazani prvi pokazni dvofazni AC prijenosni sustav i prvi pokazni trofazni AC prijenosni sustav.

## 10. Dvofazni AC prijenosni sustavi

Na Međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi u Frankfurtu na Majni 1891. godine prikazan je prvi pokazni dvofazni AC prijenosni sustav njemačke tvrtke Schuckert & Co. koji je prenosio električnu energiju na udaljenost od 4 kilometra. Komercijalni dvofazni AC prijenosni sustavi švicarske tvrtke Brown, Boveri & Cie. (BBC) i američke tvrtke Stanley Electric Mfg. Co. prethodili su Westinghouseovoj demonstraciji dvofaznog sustava na Svjetskoj kolumbovskoj izložbi u Chicagu 1893. godine. Dva komercijalna dvofazna AC prijenosna sustava puštena su u pogon 1892. godine: hidroelektrana u Badenu u Švicarskoj koju je sagradila tvrtka BBC i kombinacija eksperimentalnog i komercijalnog dvofaznog AC sustava u Pittsfieldu, u američkoj saveznoj državi Massachusetts, koji je sagradila tvrtka Stanley Electric. Do kraja 1894. godine tvrtka Stanley Electric sagradila je još jedan komercijalni dvofazni AC sustav u Kanadi i 22 u SAD-u.<sup>146</sup>

Westinghouse je najavio dvofazne „Tesline” motore i generatore ubrzo nakon kupnje Teslinih patenata 1888. godine, ali su mu se ispriječile financijske poteškoće. Dana 23. travnja 1891. godine George Westinghouse je poslao pismo dioničarima u kojem ih je pozvao da prihvate odredbe sporazuma koji bi njegovu tvrtku Westinghouse Electric Co. izbavio s ruba stečaja. Kriza je uzrokovala poremećaje u poslovanju tvrtke. Oporavak je započeo kada je njegovoj tvrtki pod novim imenom Westinghouse Electric & Manufacturing Co. dodijeljen ugovor

---

<sup>144</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 414.

<sup>145</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 103-104.

<sup>146</sup> A. Allerhand, *The Earliest Years of Three-Phase Power – 1891-1893*, 2020., str. 226.

za izvedbu rasvjete Svjetske kolumbovske izložbe u Chicagu 1893. godine, a za napajanje su korišteni masivni „Teslini“ generatori radne snage 750 kW, napona 2 kV. Bila je to javna demonstracija dvofaznog AC prijenosnog sustava. Prvi komercijalni višefazni AC Westinghouseov sustav, koji je javno zabilježen, bio je tek onaj na slapovima Niagare, koji je započeo dvofazni lokalni prijenos u obližnju industriju 1895. godine i trofazni prijenos u Buffalo, grad u američkoj saveznoj državi New York, 1896. godine. Tvrtka Westinghouse još je uvijek koristila dvofazne generatore 1896. godine, ali se taj dvofazni sustav pretvarao u trofazni sustav za prijenos električne energije na veliku udaljenost na Niagari i drugdje jer su trofazni vodovi koristiti 25 % manje bakra od dvofaznih vodova.<sup>147</sup>

Na Svjetskoj kolumbovskoj izložbi u Chicagu 1893. godine Westinghouseov dvofazni AC sustav je napajao žarulje sa žarnom niti, lučne svjetiljke, DC motore i za stacionarne i za vučne svrhe, jednofazne i višefazne AC motore i davao energiju za termoelektrične i elektrokemijske potrebe iz zajedničkog dalekovoda ili prstena. Dvofazni AC generator radne snage tisuću konjskih snaga pogonio je dvofazni unaprijeđeni Teslin asinkroni AC motor. Dvofazni AC generator je napajao uzlazne transformatore na početku prijenosnog sustava i silazne transformatore na razdjelnim mjestima. Na tim je mjestima motor pokretao lučni – svjetlosni generator; rotacijski je pretvarač napajao DC motore tramvaja; napajale su se žarulje sa žarnom niti i pogonili su se različiti motori. Izumitelji i inženjeri koji su vidjeli ovaj sustav, ili čitali o njemu, brzo su shvatili značaj ovog univerzalnog AC prijenosnog sustava.<sup>148</sup>

Tijekom tzv. rata struja Westinghouse i Edison suočili su se s trećim konkurentom, Elihuom Thomsonom, koji je zajedno s kolegom iz srednje škole Edwinom J. Houstonom osnovao tvrtku Thomson-Houston Electric Company, koja se 1892. godine udružila s Edisonovom tvrtkom u novu tvrtku General Electric.<sup>149</sup> Za prvog predsjednika združene tvrtke General Electric izabran je Charles A. Coffin iz tvrtke Thomson-Houston.<sup>150</sup> Do 1895. godine kružile su glasine da su, unatoč javnom rivalstvu, George Westinghouse i Thomas Alva Edison, postigli okvirni dogovor o udruživanju patenata svojih tvrtki, a onda se to i dogodilo 1896. godine. Iako je Westinghouseu, Edisonu i financijeru J. P. Morganu očito trebalo nekoliko godina da se usuglase, dogovor koji su prihvatili omogućio je tvrtki General Electric da koristi Tesline patente višefaznog AC motora, dok je tvrtki Westinghouse bilo dopušteno korištenje Edisonovih patenata na raznim sustavima trolejbusa. Nakon što je sklopljen dogovor, združeni vlasnici patenata (kartel) usmjerili su pozornost na otkup konkurentskih

---

<sup>147</sup> Isto, str. 226.

<sup>148</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 122.

<sup>149</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 37.

<sup>150</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, 2014., str. 171.

tvrtki poput tvrtke Williama Stanleyja (koju je 1903. apsorbirala tvrtka General Electric) ili njihovo istjerivanje iz poslovanja agresivnom zaštitom Teslinih patenata višefaznog AC sustava. Do 1898. godine Teslini patenti jednofaznog AC motora, također, su bili uključeni u ugovor o udruživanju patenata, čime je postignuto da su do 1903. godine najmoćniji državni financijeri i industrijalci zajednički podržavali Tesline tvrdnje da je izumio asinkroni AC motor prije Galilea Ferrarisa. Iako je profitirao spajanjem svoje tvrtke s tvrtkom General Electric, Stanley je optužio vlasnike Teslinih patenata to da vode sustavnu kampanju dajući „veliku težinu javnom mnijenju“ kako bi sudovima sugerirali kakve njihove presude trebaju biti. Prema Stanleyju, „njihovi napori da privuku pozornost na izumitelja i njegov rad bili su vješto dopunjeni brojnim, zapanjujućim izjavama, obećanjima i otkrićima“ samog Tesle.<sup>151</sup>

Prvi dvofazni AC prijenosni sustav na području Republike Hrvatske bio je prijenosni sustav između HE Jaruge 2 i tvornice kalcijeva karbida u šibenskoj gradskoj četvrti Crnici. Tvornicu, elektranu i prijenosni vod izgradila je tvrtka SUFID. Tvrtka SUFID (*tal.* Società anonima per l'utilizzazione delle forze idrauliche della Dalmazia) osnovana je 1902. godine sa sjedištem u Milanu, a potom joj je sjedište prebačeno u Trst. Tvrtka SUFID je bila registrirana za iskorištavanje vodnih snaga Dalmacije, proizvodnju karbida, cijanamida, sode, aluminija, za izrađivanje minerala, kovina te osnivanje sličnih industrija elektrokemijske i elektrotehničke naravi. Sjedište SUFIDA se ubrzo iz Trsta preselilo u Beč.<sup>152</sup> Ova je tvrtka odigrala vrlo važnu ulogu u počecima razvoja elektrifikacije Dalmacije.

HE Jaruga 2 puštena je u pogon 1. prosinca 1903. godine. U njoj je tvrtka Ganz montirala dva dvofazna AC agregata od 3.500 KS s dvojn timer Francisovim turbinama. Dvofazni su generatori bili snage 3 MVA, napona 15 kV i frekvencije 42 Hz. Napon od 15 kV se od generatora vodio dalekovodom do tvornice u Crnici. Duljina voda je bila 12 kilometara, a bakreni vodiči dvofaznog četverožičnog voda imali su poprečni presjek 64 mm<sup>2</sup>. U tvornici je bilo osam jednofaznih uljnih transformatora snage 700 kVA, posebno građenih za karbidne peći. Prijenosni omjer transformatora je bio 15.000/48 V. Ova je hidroelektrana 1914. godine, nakon demontaže HE Krke (Jaruge 1) preuzela elektroopskrbu grada Šibenika.<sup>153</sup> Na Ganzovom službenom popisu najvećih izrađenih hidrogenerators nalaze se i dva dvofazna hidrogenerators snage 3 MVA izrađena za HE Jarugu 2 tijekom 1902. godine.

---

<sup>151</sup> C. Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, 2015., str. 109-110.

<sup>152</sup> T. Anić, *Poduzeća SUFID i La Dalmatienne od osnutka do Drugog svjetskog rata: crtice iz elektrifikacije Šibenika i okolice*, 2020., str. 446.

<sup>153</sup> Ž. Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, 2006., str. 35.

Bez obzira na rat, tijekom 1916. godine obavljena je prva velika rekonstrukcija HE Jaruge 2 te je povećana snaga turbina, a elektrana je s dvofaznog preinačena na trofazni sustav.<sup>154</sup>

## 11. Trofazni AC prijenosni sustavi

Koristeći svoj trofazni sinkroni AC generator izrađen 1887. godine i trofazni sinkroni AC motor (preinačeni DC strojevi kojima je tri simetrično raspoređene točke na armaturnom namotu spojio na po tri klizna prstena), Haselwander je u ožujku 1888. godine, demonstrirao prijenos trofazne struje s jednog stroja na drugi, barem na probnoj razini.<sup>155</sup> To je bio prvi prijenos električne energije između dva sinkrona AC stroja pomoću trofaznog (trožičnog) voda. Sustav trofaznog AC prijenosa električne energije koji je osmislio Haselwander, a sastoji se od trofaznog sinkronog AC generatora, uzlaznog transformatora, dalekovoda, silaznog transformatora i trofaznog sinkronog AC motora, prikazan na Sl. 9, opisan je u jednoj od njegovih patentnih prijava. Međutim, korištenje izmjenične struje zabranile su telekomunikacijske vlasti zbog navodnog kvara telegrafske linije uslijed rada njegovog trofaznog sustava. Možda je ovaj okršaj bio dio tzv. rata struja? Činjenica da je tihi mislilac Haselwander napravio mnogo propusta s patentnim prijavama i zaštitom svojih patentnih prava te da je imao jake protivnike mora se smatrati tragedijom s obzirom na njegove izvrsne ideje i rad.<sup>156</sup>

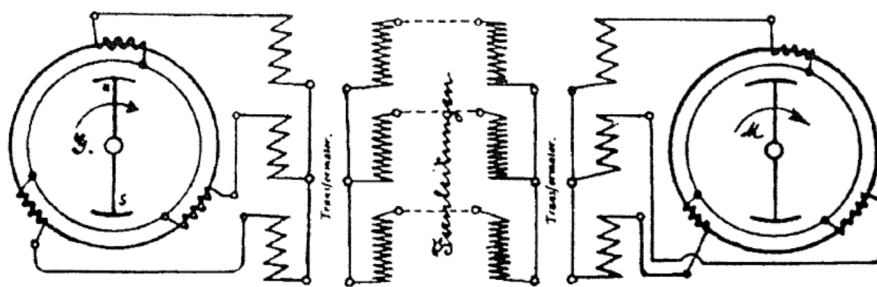
Izumitelji Nikola Tesla, Galileo Ferraris, August Haselwander i Charles Bradley nisu jedini na popisu izumitelja i znanstvenika koji su teorijski ili praktično doprinijeli izumu višefaznog AC motora, AC generatora i AC prijenosnog sustava. Međutim, retrospektivno gledano, čini se da Ferraris ima prvenstvo u opisu ideje koja je temelj izuma okretnog magnetskog polja; da je Tesla podnio prvu uspješnu patentnu prijavu; da je Ferraris prvi javno (predavanjem) najavio izum ili otkriće; te da su Haselwander i Bradley konstruirali prve funkcionalne višefazne AC generatore. Unatoč tome, razvoj ekonomičnog višefaznog AC sustava, koji se sastoji i od motora i od generatora nije bio djelo samo ovih izumitelja. Elektroenergetske tvrtke u tom će nastojanju zauzeti vodeće mjesto. Do 1900. godine veće elektroenergetske tvrtke su se opredijelile za trofazni AC sustav s asinkronim AC motorom. Najzaslužnija tvrtka za razvoj ovog sustava u Europi, a vjerojatno i u ostatku svijeta, bila je njemačka tvrtka AEG iz Berlina, a glavni inženjer ove tvrtke, koji je, osim toga,

<sup>154</sup> J. Moser, *Šibensko munjivo – Crtica o izgradnji i korištenju prvog cjelovitog elektroprivrednog sustava u Hrvatskoj*, 1998., str. 17.

<sup>155</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 414.

<sup>156</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 61-63.

zaslužan za razvoj i konstrukciju trofaznog asinkronog AC motora, bio je Michael von Dolivo-Dobrowolsky.<sup>157</sup>



Sl. 9.: Haselwanderov trofazni AC prijenosni sustav

Saznavši za otkrića i izume Nikole Tesle i Galilea Ferrarisa iz tehničkih publikacija, Dolivo-Dobrowolsky je počeo eksperimentirati s višefaznim strojevima. Sumnjao je u Ferrarisov zaključak da višefazni motor u najboljem slučaju može postići samo 50 % učinkovitosti, a njegovi su eksperimenti dokazali da je Ferraris pogriješio. Osim toga, Dolivo-Dobrowolsky je doveo u pitanje Teslino i Westinghouseovo veličanje dvofaznog AC sustava. Temeljito istražujući različite višefazne sustave s ispitnim motorom, odlučio se za trofazni sustav kao najbolji, kojem je dao naziv, koji se i sada koristi u Njemačkoj, Drehstrom (rotirajuća struja). Osim toga, patentirao je najjednostavniji i praktični trofazni asinkroni AC motor s kaveznom rotorom, motor koji se i danas naširoko koristi i kopira. Zanimljivo je napomenuti, da je u svojim kasnijim godinama razvijao istosmjerni visokonaponski prijenosni sustav. Stoga ne čudi da je 1957. godine njemačko strukovno udruženje Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) zaključilo da je Dolivo-Dobrowolsky, zajedno s Ferrarisom, Teslom, Bradleyjem i Haselwanderom, izumitelj trofaznog AC sustava. Odbor VDE-a, koji je posebno bio zadužen za istraživanje i utvrđivanje prvenstva u izumu trofaznog AC sustava, uključio je Šveđanina Jonasa Wenströma i Švicarca Charlesa E. L. Browna među izumitelje trofaznog AC sustava.<sup>158</sup>

<sup>157</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 118-119.

<sup>158</sup> Isto, str. 119.

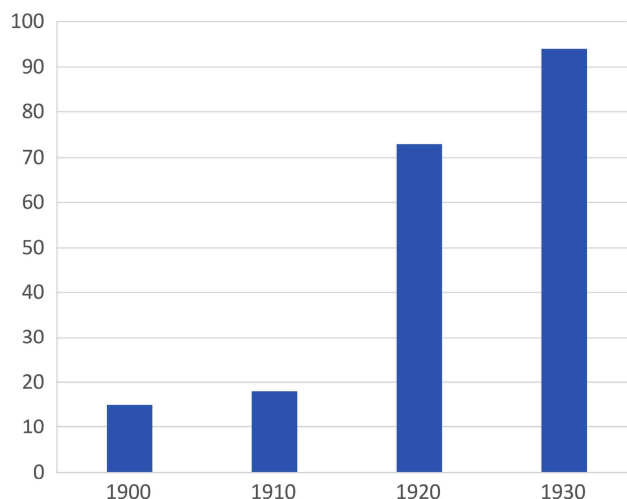
Tablica 1.: Prvi komercijalni trofazni AC prijenosni sustavi pušteni u pogon  
1892. i 1893. godine

| Početak<br>rada | kW  | Hz | Generator<br>kV | Vod<br>kV | Vod<br>km | Vlasnik ili drugo                                    | Proizvođač          |
|-----------------|-----|----|-----------------|-----------|-----------|------------------------------------------------------|---------------------|
| 1892.           | 340 | 40 | 0,05            | 5         | 10        | Lauffen – Heilbronn,<br>Njemačka                     | MFO i<br>AEG        |
| 1892.           | 220 |    | 0,08            | 0,66      | 1         | Bockenheim<br>(Frankfurt),<br>Njemačka               | Lahmeyer            |
| 1892.           | 95  |    |                 | 5         | 17        | Spreitenbach -<br>Wiedikon<br>Švicarska              | MFO                 |
| 1892.           | 335 | 50 | 0,05            | 13        | 19        | Bülach – Oerlikon,<br>Švicarska                      | MFO                 |
| 1893.           | 200 | 40 | 0,08            | 1,8       | 3         | Biel, Švicarska                                      | Lahmeyer            |
| 1893.           | 80  | 50 | 1,5             | 1,5       | 4         | Erding, Njemačka                                     | Siemens &<br>Halske |
| 1893.           | 80  |    | 0,12            | 5         | 4         | Elgóibar i Elbar,<br>Španjolska                      | Siemens &<br>Halske |
| 1893.           | 150 |    |                 | 5,2       | 9         | Wangen, Njemačka                                     | MFO                 |
| 1893.           | 75  |    | 1               | 1         | 2         | Pergine, Austro-<br>Ugarska (sada<br>Italija)        | MFO                 |
| 1893.           | 750 |    | 0,23            | 0,23      | 1         | Novorosijsk, Rusija                                  | BBC                 |
| 1893.           | 500 | 50 | 2,5             | 2,5       | 12        | Redlands Elec. Light<br>& Pwr. Co.,<br>Redlands, SAD | General<br>Electric |
| 1893.           | 300 |    | 0,7             | 7         | 18        | Hartford, SAD                                        | General<br>Electric |
| 1893.           | 300 | 70 | 0,15            | 5         | 14        | Hellsjön –<br>Grängesberg,<br>Švedska                | ASEA                |

Prvi pokazni cjeloviti trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt sagrađen je za Međunarodnu elektrotehničku izložbu u Frankfurtu na Majni 1891. godine. To je, tehnološki gledano, bio pravi kraj tzv. rata struja, a ne puštanje u pogon hidroelektrane na slapovima Niagare u SAD-u 1895. godine. Glavni tvorci ovog sustava bile su tvrtke AEG iz Berlina i MFO iz Züricha. U široj, pa čak i

stručnoj, javnosti mnogi nikad nisu čuli za prvi pokazni trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt, ali i mala djeca diljem svijeta znaju za dvofaznu AC hidroelektranu izgrađenu 1895. godine na slapovima Niagare u SAD-u. I, naravno, većina pogrešno vjeruje da je ta hidroelektrana na slapovima Niagare bila baš trofazna.

Izgradnja komercijalnih trofaznih AC prijenosnih sustava započela je 1892. godine, a prvi komercijalni trofazni AC prijenosni sustavi pušteni u pogon 1892. i 1893. godine navedeni su u Tablici 1. Indikativno je da je u tom dvogodišnjem razdoblju tvrtka General Electric, nastala 1892. godine udruživanjem tvrtki Edison General Electric i Thomson-Houston, izgradila i pustila u pogon dva trofazna AC prijenosna sustava, a tvrtka Westinghouse nijedan. Dakle, Edisonova je tvrtka već 1893. godine, za razliku od tvrtke Westinghouse, gradila trofazne AC prijenosne sustave, što nedvojbeno ukazuje na to da je tzv. rat struja bio okončan prije 1895. godine, odnosno prije no što je puštena u pogon u javnosti općepoznata dvofazna hidroelektrana na slapovima Niagare. U prvim godinama opće elektrifikacije, postotni se udjel niskonaponskih i visokonaponskih DC sustava te jednofaznih, dvofaznih i trofaznih AC sustava, od države do države, značajno mijenjao s protokom vremena. Sl. 10 prikazuje rast postotnog udjela trofaznih AC sustava u Njemačkoj od 1900. do 1930. godine.<sup>159</sup>



Sl. 10.: Postotni udjel trofaznih AC sustava u Njemačkoj

<sup>159</sup> A. Allerhand, *The Earliest Years of Three-Phase Power – 1891-1893*, 2020., str. 226.

## 12. Prvi značajni trofazni AC prijenosni sustavi u Hrvatskoj

Ako se gleda instalirana snaga i značaj AC elektrana izgrađenih do 1918. godine na području Hrvatske uvjerljivo je prednjačila elektrifikacija Dalmacije u odnosu na elektrifikaciju ostatka Hrvatske.<sup>160</sup> To se prvenstveno može zahvaliti elektrotvrtki Ganz koja je proizvela i ugradila električne strojeve i elektroopremu, a još više talijanskom dioničkom društvu SUFID, koje je financiralo gradnju trofaznih hidroelektrana i trofaznih AC prijenosnih sustava u Dalmaciji radi električnog napajanja svojih tvornica u šibenskoj Crnici i u Dugom Ratu. Tvrtka SUFID je izgradila dvije velike trofazne hidroelektrane: HE Manojlovac (Miljacku) i HE Kraljevac. Ne treba zaboraviti ni SUFID-ovu HE Jarugu 2, koja je 1903. godine puštena u pogon kao dvofazna hidroelektrana, ali je 1914. godine, nakon rekonstrukcije, postala trofazna hidroelektrana. O HE Jarugi 2 više je rečeno na kraju poglavlja 10.

Tvrtka Ganz je 1904. godine izradila četiri 12-polna trofazna hidrogenatora nazivne snage 5,2 MVA, nazivnog napona 30 kV, frekvencije 42 Hz, za HE Manojlovac (Miljacku)<sup>161</sup>, koja je izgrađena na rijeci Krki, 15 kilometara nizvodno od Knina, u Nacionalnom parku Krka. Proizvedena se električna energija prenosila, 35 kilometara dugim, dvostrukim trofaznim dalekovodom do nadograđene tvornice kalcijevog karbida u šibenskoj Crnici. Osim šest faznih bakrenih vodiča promjera 9 mm, na vrhu drvenih stupova nalazilo se zaštitno uže radi zaštite od munje, koje je bilo uzemljeno na svakom drugom stupu.<sup>162</sup> Jedan generator HE Manojlovca (Miljacke) pušten je u pogon 1906. godine, dok su tri preostala generatora puštena u pogon 1907. godine.<sup>163</sup>

Tvrtka SUFID je sagradila trofaznu hidroelektranu Kraljevac, na rijeci Cetini kod Zadvarja, da bi iz nje preko, 23 kilometra dugog, trofaznog dvostrukog dalekovoda opskrbila električnom energijom svoju novu veliku tvornicu kalcijeva karbida i kalcijeva cijanamida u Dugom Ratu. Prijenosni napon dalekovoda je bio 56 kV.<sup>164</sup> Treba naglasiti da je ta hidroelektrana omogućila početak elektrifikacije Omiša (1914. godine) i napredniju elektrifikaciju Splita (1927. godine).<sup>165</sup> HE Kraljevac je puštena u pogon 1913. godine<sup>166</sup> kada su proradila dva 16-polna Ganzova trofazna hidrogenatora nazivne snage

---

<sup>160</sup> B. Markovčić i dr., *Razvoj elektrifikacije Hrvatske – 1. dio – Od početka elektrifikacije do 1945. godine*, 1984., str. 13.

<sup>161</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 8.

<sup>162</sup> Ž. Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, 2006., str. 46.

<sup>163</sup> J. Moser, *Šibensko munjivo – Crnice o izgradnji i korištenju prvog cjelovitog elektroprivrednog sustava u Hrvatskoj*, 1998., str. 16.

<sup>164</sup> T. Fagarazzi, *Hidroelektrana Kraljevac 1912. u europskom kontekstu*, 2014., str. 49.

<sup>165</sup> Isto, str. 5.

<sup>166</sup> Isto, str. 21.



16 MVA, nazivnog napona 4 kV, frekvencije 50 Hz, brzine vrtnje 375 o/min.<sup>167</sup> Dva trofazna transformatora 56/4 kV, nazivne snage 16 MVA, ugrađena su 1912. godine u HE Kraljevcu, a bili su tada najveći trofazni transformatori na svijetu.<sup>168</sup> U Dugom Ratu, na drugoj strani dalekovoda, ugrađena su dva trofazna transformatora slična onima u hidroelektrani; razlika je bila samo u prijenosnom omjeru, koji je ovdje bio 51/15 kV.<sup>169</sup> Proizvodnja kalcijevog karbida u Dugom Ratu započela je 14. ožujka 1914. godine.<sup>170</sup>

U drugoj fazi izgradnje HE Kraljevac, 1932. godine ugrađena su i puštena u pogon još dva 16-polna Ganzova trofazna hidrogenerators nazivne snage 26 MVA (izrađena 1926. godine), nazivnog napona 3,8 kV, frekvencije 50 Hz.<sup>171</sup> Važno je napomenuti da su 1929. godine dioničari tvrtke SUFID prodali sve svoje industrijske objekte u Dalmaciji, uključujući i HE Kraljevac, francuskoj tvrtki La Dalmatienne, te su se odrekli koncesija za iskorištavanje vodnih snaga Dalmacije.<sup>172</sup>

Prema službenom popisu najvećih hidrogenerators tvrtke Ganz izrađenih do 1969. godine, koji sam dobio od dr. sc. Gábora Náдора, zaposlenika tvrtke Ganz, generatori ugrađeni u HE Kraljevac bili su najveći hidrogenerators izrađeni u tvrtki Ganz najmanje do 1969. godine. Dva trofazna hidrogenerators nazivne snage 26 MVA, u trenutku puštanja u pogon, 1932. godine, bili su, prema mađarskoj literaturi, hidrogenerators najveće nazivne snage u Europi.<sup>173</sup>

Jednofazni AC prijenosni sustav HE Krke (Jaruge 1), dvofazni AC prijenosni sustav HE Jaruge 2 i trofazni AC prijenosni sustav HE Manojlovca (Miljacke) imali su samo silazne transformatore, dok je trofazni AC prijenosni sustav od HE Kraljevca do Dugog Rata imao i uzlazne i silazne transformatore, poput prvog pokaznog trofaznog AC prijenosnog sustava Lauffen-Frankfurt 1891. godine.

Prvi paralelni rad rekonstruiranih hidroelektrana HE Manojlovca (Miljacke) i HE Jaruge 2, preko trafostanice TS Lozovac 30/6 kV, ostvaren je tek 1947. godine. Ovaj je elektroenergetski sustav bio trofazni, frekvencije 50 Hz, a 1948. godine priključila mu se i hidroelektrana HE Kraljevac preko novoizgrađenog dalekovoda Kraljevac-Lozovac.<sup>174</sup> Novoizgrađeni dalekovod Kraljevac-Lozovac bio je 110 kV dalekovod, koji je privremeno bio pod naponom

---

<sup>167</sup> Isto, str. 31.

<sup>168</sup> Isto, str. 41.

<sup>169</sup> Isto, str. 34.

<sup>170</sup> Isto, str. 34.

<sup>171</sup> Isto, str. 51-52.

<sup>172</sup> T. Anić, *Poduzeća SUFID i La Dalmatienne od osnutka do Drugog svjetskog rata: crtice iz elektrifikacije Šibenika i okolice*, 2020., str. 449-450.

<sup>173</sup> P. Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, 1978., str. 10.

<sup>174</sup> Ž. Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, 2006., str. 54.

od 56 kV, a HE Kraljevac je na 110 kV mrežu priključen 1955. godine.<sup>175</sup>

U kontekstu trofaznih AC prijenosnih sustava, nesumnjivo je vrijedan spomena i trofazni AC prijenosni sustav HE Ozalj iz 1908. godine, koji je omogućio vrlo kvalitetnu elektrifikaciju Karlovca i Ozlja. Elektroopremu i trofazne hidrogeneratore isporučila je austrijska tvrtka Elin iz štajerskog grada Weiza, osim DC uzбудnika koje je isporučila tvrtka Franz Pichler iz istog grada. U prvoj fazi izgradnje, ugrađena su dva trofazna hidrogeneratorska od 750 kVA, nazivnog napona 5 kV, frekvencije 50 Hz. Od HE Ozalj do Karlovca je bio izveden nadzemni trofazni vod duljine 17 kilometara, prijenosnog napona 20 kV. U Karlovcu je izgrađena trafostanica 20/5 kV s dva kabelska voda prema gradu, u kojem je bilo 13 transformatorskih stanica 5/0,19 kV. Mreža napona 5 kV bila je ukupno duga 5,3 kilometra, a niskonaponska mreža 20 kilometara. Drugi nadzemni trofazni vod duljine 5,3 kilometra, prijenosnog napona 5 kV, prenosio je električnu energiju od HE Ozalj do grada Ozlja. Godine 2013. u HE Ozalj ugrađen je i treći hidrogenerator iste nazivne snage kao i dva postojeća hidrogeneratorska.<sup>176</sup>

U solinskom se Majdanu 1908. godine počela graditi tvornica cementa imena *Solin a. d. za cement portland* kao i trofazna hidroelektrana HE Majdan (Vrilo), na izvoru rijeke Jadro, radi opskrbe ove tvornice cementa. Tvornica cementa je započela s radom 1909. godine.<sup>177</sup> To su, zapravo, bile dvije međusobno povezane trofazne hidroelektrane na istom vodotoku. Veća hidroelektrana HE Majdan (Vrilo) imala je dvije dvostruke Francisove turbine od 810 KS izravno povezane na trofazne hidrogeneratorske tvrtke AEG od 600 kVA, dok je manja hidroelektrana HE Vrilo 2, nizvodno od prve hidroelektrane, imala jednu Francisovu turbinu od 145 KS i trofazni generator od 110 kVA. To su bili generatori nazivnog napona 3,15 kV, frekvencije 50 Hz. Ove dvije hidroelektrane bile su međusobno povezane trofaznim nadzemnim vodom napona 3 kV, duljine jednog kilometra. Iz HE Vrilo 2 do tvornice cementa električna je energija prenošena izravno kabelom duljine 200 metara.<sup>178</sup> Grad Split je 1920. godine počeo iz HE Majdan (Vrilo) napajati svoju prvu električnu rasvjetu preko novoizgrađenog 10 kV nadzemnog dalekovoda, duljine 6,5 kilometara, od HE Majdan (Vrilo) do trafostanice na splitskoj Manuškoj poljani.<sup>179</sup> Međutim, ta je električna rasvjeta bila nedostatna, a Split je puno kvalitetniju električnu rasvjetu dobio tek 1927. godine kada je do njega prenesena

---

<sup>175</sup> T. Fagarazzi, *Hidroelektrana Kraljevac 1912. u europskom kontekstu*, 2014., str. 55.

<sup>176</sup> M. Kalea, *Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj do 1918. godine*, Strojstvo hrvatske elektroprivrede, 1995., str. 71.

<sup>177</sup> J. Barić, *Izgradnja hidroelektrane na rijeci Jadro i elektrifikacija Splita*, 2022., str. 110.

<sup>178</sup> B. Markovčić i dr., *Razvoj elektrifikacije Hrvatske – 1. dio – Od početka elektrifikacije do 1945. godine*, 1984., str. 166.

<sup>179</sup> Isto, str. 170

električna energija iz HE Kraljevca preko, 17 kilometara dugog, novoizgrađenog nadzemnog trofaznog 50 kV dalekovoda od Dugog Rata do trafostanice u Dujmovači i dvostrukog 10 kV nadzemnog trofaznog voda od Dujmovače do Splita.<sup>180</sup>

Na mjestu gdje se preko Roškog slapa rijeka Krka ulijeva u Visovačko jezero, 1909. godine, sagrađena je protočna hidroelektrana HE Roški slap i to prvenstveno radi opskrbe električnom energijom rudnika mrkog ugljena u Siveriću, koji je bio u vlasništvu talijanske tvrtke Monte Promina. U elektrani su bile instalirane dvije vodne turbine od 660 KS i dva trofazna hidrogeneratora tvrtke AEG-Union od 500 kVA, napona 3,3 kV, frekvencije 50 Hz. Rudarski pogoni u Siveriću opskrbljivani su električnom energijom iz HE Roški slap preko trofaznog nadzemnog 15 kV dalekovoda, duljine 28 kilometara. Općina Drniš se 1915. godine priključila na taj dalekovod preko vlastitog transformatora prijenosnog omjera 15/0,4 kV i time omogućila javnu elektrifikaciju grada Drniša.<sup>181</sup>

Ne treba zanemariti ni trofazni AC prijenosni sustav od HE Kuzmice do Slavonske Požege, koji je pušten u pogon 1912. godine. Trofazni nadzemni vod od HE Kuzmice do Slavonske Požege, prijenosnog napona 6,3 kV, bio je dug 6,2 kilometra, a gradska visokonaponska kabelska mreža bila je duga dva kilometra. Niskonaponska je trofazna nadzemna mreža bila napajana preko šest trafostanica prijenosnog omjera 6,3/0,11 kV. U HE Kuzmici je bio instaliran trofazni hidrogenerator od 295 kVA i dizelski agregat s trofaznim generatorom od 155 kVA.<sup>182</sup> Dizelski je agregat bio u pogonu samo kad je dotok vode bio nedostatan.<sup>183</sup>

### 13. Trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt

Njemački elektroinženjer Oscar von Miller bio je tehnički direktor Međunarodne elektrotehničke izložbe održane u Frankfurtu 1891. godine i pokretačka snaga za ostvarenje pokaznog trofaznog AC prijenosa na udaljenost od čak 175 kilometara, snage 200 kW pri linijskom naponu 14 kV do 25 kV, od Lauffena do Frankfurta (Sl. 11). Nositelji projekta bili su Oskar von Miller, Michael von Dolivo-Dobrowolsky i njegova njemačka tvrtka AEG, te Charles E. L. Brown i njegova švicarska tvrtka MFO. Imali su veliku podršku i pomoć od Njemačke carske pošte, koja je odradila vrlo zahtjevan zadatak trasiranja i

---

<sup>180</sup> Isto, str. 172.

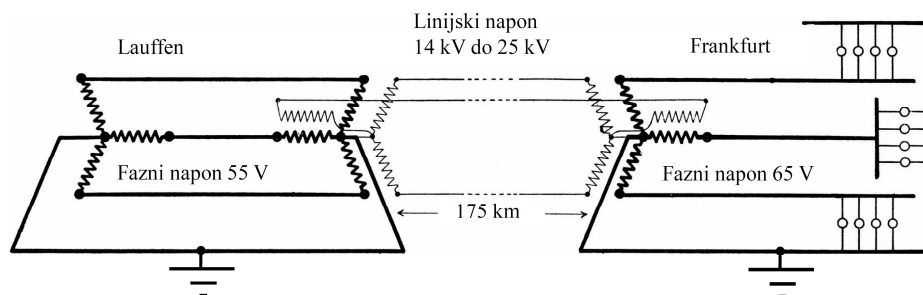
<sup>181</sup> Isto, str. 156 i 159.

<sup>182</sup> *Stoljeće električne energije u Požegi 1912. – 2012.*, 2012., str. 85-86.

<sup>183</sup> M. Kalea, *Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj do 1918. godine*, *Stoljeće hrvatske elektroprivrede*, 1995., str. 67.

izgradnje ovog trofaznog prijenosnog nadzemnog voda.

U Lauffenu je tvornica cementa projektantima ustupila vodnu turbinu od 300 konjskih snaga. Za dalekovod Lauffen-Frankfurt bakrenu je žicu posudila tvrtka Hesse iz Hedderneima. Tvrtka MFO isporučila je dva trofazna generatora, koji su mogli dati tri fazne struje od po 1,4 kA na oko 55 V faznog napona, pri čemu je frekvencija bila 40 Hz. Tvrtke AEG i MFO dale su po dva transformatora koji su radili naizmjenično; tvrtka AEG je isporučila upravljačke ploče. Na izložbi je bio trofazni asinkroni AC motor od 100 konjskih snaga, koji je projektirao Michael von Dolivo-Dobrowolsky, a konstruirala ga je tvrtka AEG, te drugi manji motori. Trofazni je asinkroni AC motor pogonio centrifugalnu pumpu, uzimajući oko 60 konjskih snaga, podižući vodu umjetnog vodopada visokog oko 10 m, u blizini izložbe. Osim ovih motora, iz ovog prijenosnog sustava napajano je i oko tisuću žarulja na velikom reklamnom znaku koji je izradila tvrtka AEG. Složena ispitivanja koja je ispitno povjerenstvo provelo u jesenskim mjesecima, uglavnom pod faznim naponom dalekovoda od oko 8 kV, pokazala su da je električna energija koja je stigla u Frankfurt iznosila (u prosjeku) čak 74 posto energije koju je davala turbina u Lauffenu, a koja je pogonila trofazni AC generator.



Sl. 11. Trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt<sup>184</sup>

Trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt bio je mnogo više od pukog eksperimenta. Bila je to odvažna i uspješna demonstracija ne samo korisnosti visokih napona u prijenosu električne energije, već i demonstracija nadmoći višefaznih AC sustava. Kao takav označio je početak komercijalne primjene AC električne energije. Izazvao je izvanredan interes na cijelom europskom kontinentu, a posebno u Njemačkoj. To je bio veliki projekt od državne važnosti pa je i njemački car na samom početku projekta donirao 10

<sup>184</sup> S. P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, 1895., str. 107.

tisuća maraka za troškove projekta.<sup>185</sup>

Za trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt, osnovni dizajn transformatora s rasporedom stupova u obliku trokake prizme napravila je tvrtka AEG. Upotrebu ulja kao izolacijskog medija predložio je Charles E. L. Brown, koji je tijekom važnih prethodnih ispitivanja stavio dva mala jednofazna transformatora u spremnike s uljem te je s vrlo dobrim uspjehom dizao napon nadzemnog voda do 30 kV. Želio je stvoriti visokonaponsku izolaciju otpornu na vlagu i starenje. U tu je svrhu ispitao, između ostalog, probojnu čvrstoću ulja te impregnaciju i sušenje ulja na 150 °C. Zadovoljen je bitan uvjet za korištenje visokog napona u namotima transformatora. Visokonaponska ispitivanja provedena u tvrtki MFO razriješila su ključno pitanje je li uopće moguće prenositi električnu energiju golim vodičima na predloženom naponu od 20 do 30 kV.<sup>186</sup>

Trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt prikazan na Međunarodnoj električnoj izložbi u Frankfurtu na Majni 1891. godine dokazao je ne samo mogućnost korištenja udaljenih vodoopskrbnih mjesta za opskrbu električnom energijom u gusto naseljenim industrijskim područjima, već i prikladnost višefaznih AC sustava za prijenos električne energije na velike udaljenosti. Izložba u Frankfurtu istaknula je mogućnosti onoga što je postalo poznato kao prijenos od točke do točke, za razliku od prijenosa preko mreže ili prstena. Trofazni vod Lauffen-Frankfurt, dug 175 kilometara, izvrstan je primjer prijenosa od točke do točke, dok su regionalni elektroenergetski sustavi 1920-ih godina bili primjeri prijenosa električne energije preko mreže ili prstena.<sup>187</sup>

Sjajan ishod trofaznog AC prijenosa električne energije Lauffen-Frankfurt 1891. godine, kojem su glavni elektroinženjeri Charles Brown i Michael von Dolivo-Dobrowolsky dali veliki doprinos na području visokog napona i elektrostrojarstva, nije spriječio njih dvojicu da nakon toga budu veliki neprijatelji. S jedne je strane bio Charles Brown, koji je postao veliki zagovornik jednofazne AC tehnologije i koji je, nakon što je napustio tvrtku MFO, osnovao vlastitu elektrotvrtku Brown, Boveri & Cie. (BBC). S druge strane, u tvrtki AEG, upravo je Michael von Dolivo-Dobrowolsky bio zadužen za razvoj trofaznog sustava. Charles Brown postao je veliki javni protivnik trofaznog AC sustava. Takav Brownov stav neki suvremenici nisu mogli razumjeti, a on bi se mogao u najboljem slučaju razumjeti u tom smislu da je pokušao uzdići sebe i svoju novu tvrtku BBC u odnosu na tvrtke MFO i AEG, te da je učinio sve što je mogao da izbjegne patentna ograničenja.<sup>188</sup> U prilog toj tvrdnji ide i to što je, prema Tablici 1, 1893. godine njegova tvrtka BBC izgradila trofazni AC sustav u ruskom gradu

---

<sup>185</sup> Isto, str. 103-110.

<sup>186</sup> Von F. Hillebrand, *Zur Geschichte des Drehstromes*, 1959., str. 454.

<sup>187</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 129-130.

<sup>188</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 128-130.

Novorosijsku.

Svi koji su očekivali da će usporedba konkurentskih elektroenergetskih sustava na izložbi u Frankfurtu 1891. godine i vrlo uspješan trofazni AC prijenos električne energije iz Lauffena u Frankfurt definitivno okončati sukob oko tehnički boljeg sustava, ne samo da su morali biti razočarani, već su bili doista užasnuti. Sukobi su se nastavili novim argumentima, ali neslućenim intenzitetom. Eklatantan primjer je izgradnja elektrane planirane za potrebe grada Frankfurta, koja, suprotno logičnim očekivanjima, u konačnici nije proizvodila trofaznu struju, već jednofaznu AC struju. Treba istaknuti da je nova tvrtka BBC, čiji je suosnivač bio Charles Brown, dala najjeftiniju ponudu gradu Frankfurtu i vjerojatno je to razlog što je upravo ta tvrtka, koja je predložila jednofazni AC sustav, dobila posao. Druge su elektrotvrtke smatrale da je odabir jednofaznog AC sustava pogrešan. Za Charlesa Browna i njegovu tvrtku BBC, odluka o korištenju jednofaznog AC sustava bila je veliki poslovni dobitak. Međutim, ubrzo je postalo jasno da je ova strateška odluka grada Frankfurta bila pogrešna jer se jednofazni AC sustav pokazao „neprikladnim i nezadovoljavajućim“. Zapravo, u prvih nekoliko desetljeća rada, ovaj je jednofazni AC sustav gradu Frankfurtu zadao velike brige i puno ga je koštao. Nije bilo dovoljno samo prijeći na trofazni AC sustav, nego su se morali prebaciti s frekvencije 45,3 Hz na frekvenciju od 50 Hz. Uskoro su poduzeti koraci za međusobno spajanje sve više i više gradskih elektrana u sustav više razine. Prvi uvjet za to bio je ujednačen elektroenergetski sustav.<sup>189</sup>

#### **14. Hidroelektrana na slapovima Niagare**

Ključna osoba za odabir prijenosnog sustava i izgradnju hidroelektrane na slapovima rijeke Niagare bio je Eduard Dean Adams, koji je bio jedan od osnivača tvrtke Cataract Construction Company. Tvrtka je osnovana radi iskorištavanja hidroenergije rijeke Niagare. Stoga mnogi u SAD u ovu hidroelektranu nazivaju Adamsovom hidroelektranom. Kao predsjednik tvrtke Cataract Construction Company, Adams je tražio najbolju metodu za prijenos hidroenergije do grada Buffala udaljenog 30 kilometara. Osim s Edisonom i Westinghouseom, Adams se posavjetovao i s engleskim, njemačkim i švicarskim inženjerima. U lipnju 1890. godine osnovao je Međunarodni odbor za Niagaru. Na čelu odbora je bio William Thomson (Lord Kelvin). U lipnju 1890. godine, Međunarodni odbor za Niagaru sastao se u Londonu i odlučio ponuditi novčanu nagradu za najbolji prijedlog prijenosnog sustava od Niagarinih vodopada do grada Buffala. Pozvano je ukupno 28 europskih i američkih elektrotvrtki. Stiglo je ukupno 14 prijedloga, uključujući Edisonov prijedlog za DC prijenos na veliku

---

<sup>189</sup> Isto, 131-139.

udaljenost, kao i prijedlog Westinghousea da se komprimirani zrak koristi kao prijenosni sustav. Nijedan prijedlog nije prihvaćen. U prosincu 1891. godine Adams je pozvao šest tvrtki: Westinghouse, Thomson-Houston, Edison General Electric i još tri švicarske tvrtke da daju troškovnik za električnu opremu na Niagari. Međutim, ni nakon toga nije donio konačnu odluku.<sup>190</sup>

Iako Tesla nije sudjelovao u projektiranju i izvedbi ovog višefaznog AC sustava na slapovima Niagare, novinari su sve zasluge pripisali baš njemu. Uspjeh izmjenične struje na slapovima Niagare odigrao je važnu ulogu u oblikovanju Tesline reputacije kao jednog od vodećih američkih izumitelja. Njegovi američki patenti su onemogućili europskim tvrtkama da budu nositelji ovog posla. Međutim, stvarna Teslina zasluga je to što je on pripomogao da ključni čovjek Edward Dean Adams za prijenos energije odabere baš višefazni AC prijenosni sustav.<sup>191</sup>

Nakon dodatnih konzultacija, Adams je odabrao izmjenični AC prijenosni sustav, prvenstveno zbog učinkovitosti koju je pokazao pokazni trofazni AC prijenosni sustav Lauffen- Frankfurt 1891. godine. Prva dva dvofazna sinkrona AC generatora u Adamsovoj hidroelektrani, rasklopno postrojenje i pomoćnu opremu za elektranu projektirala je i konstruirala tvrtka Westinghouse. Vodne je turbine konstruirala tvrtka I. P. Morris Company iz Philadelphije, prema projektu švicarske kompanije Faesch and Piccard. Transformatore, trofazni dalekovod od slapova Niagare do Buffala kao i transformatorsku stanicu u Buffalu, projektirala je i izvela Edisonova tvrtka General Electric. Dakle, generatori su bili dvofazni, a dalekovod je bio trofazni. Pretvaranje dvofaznog sustava u trofazni omogućio je Scottov transformator.<sup>192</sup>

Glavna Westinghouseova prednost u odnosu na druge tvrtke pri dobivanju dijela posla bili su Teslini patenti. Za izbor elektroenergetskog sustava uvelike su bila presudna i iskustva stečena u Njemačkoj 1891. godine tijekom Međunarodne elektrotehničke izložbe U Frankfurtu. Stoga je dalekovod bio trofazni.

Osim Charlesa Scotta, inženjera Westinghousea, u izvedbi ovog višefaznog AC sustava sudjelovali su i mnogi drugi inženjeri te tvrtke. Benjamin Lamme (glavni inženjer tijekom izgradnje Adamsove hidroelektrane) zaposlio se u Westinghouseu u svibnju 1889. godine. Jedan od prvih mu je zadataka bio da Tesline AC motore, koji su bili samo eksperimentalni prototipovi, unaprijedi tako da budu prikladni za praktičnu opću namjenu, odnosno da budu dobri kao motori Dolivo-Dobrowolskog. Za tvrtku Westinghouse Oliver B. Shallenberger razvio je i unaprijedio električno brojilo; Benjamin Lamme unaprijedio je magnetske krugove generatora; Benjamin Lamme i Charles Scott unaprijedili su vrlo loše

---

<sup>190</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, str. 174-175.

<sup>191</sup> Isto, 176-183.

<sup>192</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 139.

magnetske krugove Teslinih asinkronih AC motora; Albert Schmid unaprijedio je strojarski dio sustava. Osim toga, Lamme je konstruirao i novi rotacijski pretvarač, koji se sastojao od elektromotora i generatora na istoj osovini, što je bilo vrlo važno za prilagodljivost ovog višefaznog AC sustava različitim trošilima, u što spadaju i DC trošila.<sup>193</sup>

Konzultant George Forbes, britanski elektroinženjer, predložio je početne značajke dizajna elektrane, uključujući novi dvofazni AC generator, koji koristi strukturu „kišobran“ s vanjskim polovima koji se vrte oko armature. Inženjeri tvrtke Westinghouse napravili su brojne izmjene Forbesovih specifikacija, uključujući promjenu frekvencije na 25 Hz i promjenu izlaznog napona generatora s 20 kV na 2,2 kV.

Prvi dvofazni generatori proradili su 26. kolovoza 1895. godine i napajali su lokalnu industriju u gradu Niagara Fallsu. Cjeloviti sustav, uključujući trofazni vod dug 30 kilometara, pušten je u pogon tek u studenom 1896. godine.<sup>194</sup> Dakle, dvostruki jednofazni AC prijenosni sustav HE Krka-Šibenik pušten je u pogon petnaestak mjeseci prije no što je pušten u pogon trofazni dalekovod između Adamsove hidroelektrane na slapovima Niagare i grada Buffala.

Uspješna primjena ovog tada divovskog elektroenergetskog sustava na Niagari, koji je počeo s radom 1896. godine, bila je samo još jedna velika potvrda učinkovitosti trofaznog AC prijenosa. Najopsežniji izvor informacija o ovom projektu jest dvotomna povijest projekta koju je napisao Edward Dean Adams. Westinghouse je instalirao dvofazne AC generatore napona 2,2 kV i transformatore koji su pretvarali napon od 2,2 kV preko Scottova transformatora u trofazni AC napon od 11 kV, za prijenos do Buffala. Radna snaga sustava 1898. godine iznosila je oko 20 MW. Do 1925. godine radna je snaga iznosila oko 360 MW, odnosno proizvodilo se otprilike 2 % ukupne električne energije koju je tada proizvodilo oko četiri tisuće elektrana u SAD-u. Kao što je bilo i predviđeno, lokalni su korisnici na području slapova Niagare odmah sagradili tvornice koje su za pogon koristile AC energiju.<sup>195</sup>

## 15. Električna brojila

U potrazi za literaturom u kojoj se opisuju počeci razvoja električnih brojila i u Europi i u SAD-u nisam imao puno sreće, ali sam uspio pronaći Mooreov članak iz 1935. godine u kojem se navode različiti izumi i izumitelji električnog brojila i u Europi i u SAD-u. Autor u tom članku napominje da u tadašnjem

---

<sup>193</sup> Isto, str. 139.

<sup>194</sup> W. B. Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, str. 182.

<sup>195</sup> A. Allerhand, *A Contrarian History of Early Electric Power Distribution*, 2017., str. 774-775.



užurbanom i progresivnom životu čovjek ima malo vremena za proučavanje ostataka prošlosti, koliko god oni bili zanimljivi pa oni posljedično bivaju zaboravljeni.<sup>196</sup>

Za električnu rasvjetu ranih osamdesetih godina 19. stoljeća uglavnom su se koristile lučne svjetiljke, a prva metoda tjedne naplate potrošene električne energije bila je utemeljena na ukupnom broju instaliranih svjetiljki. Budući da je na tu metodu bilo puno primjedbi, ona je unaprijeđena tako da se osim ukupnog broja instaliranih svjetiljki utvrđivalo i to koliko su se potrošile grafitne elektrode lučnih svjetiljki. Na taj je način sama lučna svjetiljka postala mjerni instrument i, prema tome, može se smatrati jednim od prvih električnih brojila.<sup>197</sup>

Krajem 19. stoljeća razvijeno je više vrsta električnih brojila za potrebe mjerenja potrošnje DC električne energije, a Moore ih je u svom članku podijelio na: elektrolitska brojila, termalna brojila, brojila sa satnim mehanizmom i motorna brojila.<sup>198</sup>

Izumi elektrolitskih električnih brojila u prvim danima korištenja DC električne energije bili su najbrojniji, a između 1868. i 1906. godine za njih je prihvaćeno mnoštvo patenata. Princip rada ovih brojila utemeljen je na Faradayevim zakonima elektrolize. Prvo komercijalno elektrolitsko električno brojilo bilo je brojilo Thomasa Alve Edisona iz 1884. godine, u kojem su korištene cinkove elektrode u otopini cinkovog sulfata. Elektrolitska brojila su u biti bila ampersatna DC brojila. Unatoč tome, korištenje elektrolitskog brojila za izmjeničnu struju patentirali su Anders i Kottgen 1891. godine.<sup>199</sup>

Izumljeno je više tipova termalnih DC brojila, koja su se mogla koristiti i za mjerenje potrošnje AC električne energije, ali se ova vrsta električnih brojila u novijoj literaturi niti ne spominje. Izumljeno je i više tipova DC električnih brojila sa satnim mehanizmom, u kojima se satni mehanizam koristio samo za sumaciju. Međutim, električna brojila sa satnim mehanizmom nisu bila prikladna za praktičnu primjenu kada je potrošnja električne energije bila promjenjiva.<sup>200</sup>

Motorna su električna brojila 1935. godine bila najzastupljenija klasa brojila, a što se tiče proizvodnje, praktički su već tada istisnula sve ostale vrste električnih brojila. Motorna DC električna brojila se mogu podijeliti na: motorna brojila sa živom i kolektorska (komutatorska) električna brojila. Od 1883. godine prihvaćeni su brojni patenti za motorna električna brojila.<sup>201</sup>

---

<sup>196</sup> A. E. Moore, *The history and development of the integrating electricity meter*, 1935., str. 851-856.

<sup>197</sup> Isto, 852.

<sup>198</sup> Isto, 852.

<sup>199</sup> Isto, 852-853.

<sup>200</sup> Isto, 853-854.

<sup>201</sup> Isto, str. 854-856.

Izumljena su dva osnovna tipa DC električnih brojila sa živom, a mogla su se koristiti i za mjerenje potrošnje AC električne energije.<sup>202</sup> Ova vrsta električnih brojila danas nije od velikog značaja pa neću nabrajati izume i izumitelje ovakvih brojila. Jedan od razloga zašto su danas električna brojila sa živom neprihvatljiva jest to što se živa smatra stalnom prijetnjom za okoliš i zdravlje ljudi. Danas je općepoznato da je živa teški metal s toksičnim svojstvima.

Kolektorska električna brojila su mali DC motori, a mogu se podijeliti na magnetomotorna električna brojila i elektrodinamička električna brojila. Magnetomotorna su električna brojila vatsatna brojila i mogu se koristiti samo za DC električne sustave. Prvo magnetomotorno brojilo patentirao je C. E. O'Keenan 1898. godine i bilo je poznato kao OK električno brojilo.<sup>203</sup>

Elektrodinamička DC brojila su vatsatna električna brojila, a mogu se koristiti i za mjerenje potrošnje AC električne energije. Thomas Alva Edison 1881. godine, William Edward Ayrton i John Perry 1882. godine te Werner von Siemens 1883. godine patentirali su elektrodinamička brojila s tekućim kočnicama, a Siemensovo brojilo je bilo tako konstruirano da se kućište moglo napuniti uljem. Kočioni moment većine prvih brojila ovog tipa stvaralo je trenje u tekućini, dok su Ayrton i Perry koristili elektromagnetsku kočnicu. Na temelju prethodno navedenih izuma elektrodinamičkog brojila, 1888. je godine nastalo elektrodinamičko brojilo Elihua Thomsona, koje su, s vremena na vrijeme poboljšavali razni dizajneri i proizvođači. Ono se 1935. godine najviše od svih električnih brojila koristilo za mjerenje potrošnje DC električne energije. Međutim, Thomsonova su se električna brojila koristila i za mjerenje potrošnje AC električne energije sve dok se nisu dovoljno razvila indukcijska brojila, koja su ih u potpunosti zamijenila.<sup>204</sup>

Za mjerenje potrošnje AC električne energije razvijena su indukcijska električna brojila, koja spadaju u motorska brojila i ne mogu se koristiti za mjerenje potrošnje DC električne energije. Njihov princip rada je isti kao i princip rada dvofaznog ili jednofaznog asinkronog AC motora. U petom poglavlju ovog rada, navedeno je da je Galileo Ferraris u svom članku iz 1888. godine predložio izradu mjernih AC instrumenata na temelju predloženog principa rada dvofaznog asinkronog AC motora. Predložio je i kako od jedne faze napraviti dvije faze, tj. opisao je izum jednofaznog asinkronog AC motora. O prvenstvu izuma jednofaznog asinkronog AC motora u SAD-u vodili su se mnogi sudski sporovi do 1905. godine, a pobjedu je izvojevao moćni George Westinghouse, vlasnik Teslinih patenata, što je detaljnije opisano u petom poglavlju ovog rada.

Mnoštvo izumitelja se bavilo razvojem električnih brojila različitih vrsta i nije ih lako niti sve pobrojati. Naravno, to vrijedi i za izume i izumitelje

---

<sup>202</sup> Isto, 854.

<sup>203</sup> Isto, 855-856.

<sup>204</sup> Isto, 855-856.

indukcijskih električnih brojila. Počevši od 1888. godine izumljeni su različiti tipovi indukcijskih brojila, a Moore je u svom članku iz 1935. godine naveo da su značajniji izumitelji bili: François Borel, Emile Paccaud, Oliver B. Shallenberger, Arthur Wright, Sebastian Ziani de Ferranti i Ottó Titusz Bláthy. Prva Borel-Paccaudova, Shallenbergerova, Wrightova i Ferrantijeva indukcijska brojila bila su ampersatna brojila, dok je prvo Bláthyjevo indukcijsko brojilo bilo vatsatno. Shallenbergerovo indukcijsko ampersatno brojilo, koje je patentirano 1888. godine (US patenti br. 388.003 i 388.004), bilo je prvo indukcijsko brojilo koje se moglo uspješno koristiti u praksi, a proizvodila ga je tvrtka Westinghouse. Bláthyjevo vatsatno indukcijsko brojilo izumljeno je 1889. godine, a proizvodila ga je tvrtka Ganz. Ono se smatra prvim indukcijskim vatsatnim brojiлом i prvim indukcijskim brojiлом koje se uspješno koristilo u Europi.<sup>205</sup>

Prvo Bláthyjevo indukcijsko vatsatno brojilo patentirano je 1889. godine u Njemačkoj (D.R.P. patent br. 52793), a potom i u SAD-u 1890. godine (US patent br. 423.210). Ono je predstavljeno - s velikim uspjehom - na Međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi u Frankfurtu 1891. godine. Od 1889. do 1939. godine, neprekidno radeći u tvrtki Ganz, Bláthy je pedeset godina usavršavao električna brojila. Prihvaćeno mu je više od 100 patenata tijekom života, a gotovo 30 patenata se odnosilo na električna brojila. Danas su sva u svijetu korištena indukcijska električna brojila Bláthyjevog tipa.<sup>206</sup>

Američki izumitelj Thomas Duncan je 1892. godine konstruirao eksperimentalni model jednofaznog vatsatnog električnog brojila, koje nikad nije izrađeno za prodaju. Tek je 1894. godine Shallenberger za tvrtku Westinghouse konstruirao svoje prvo indukcijsko vatsatno električno brojilo (US patenti br. 531.866 i 531.867). To je bilo prvo komercijalno indukcijsko vatsatno električno brojilo u SAD-u, koje se na samom početku prodavalo za oko 15 dolara. Prvo indukcijsko vatsatno električno brojilo američke elektrotvrtke General Electric, koje su konstruirali Elihu Thomson i William H. Pratt, pušteno je u prodaju 1897. godine, a ono je zamijenilo Thomsonovo elektrodinamičko brojilo.<sup>207</sup>

## 16. Obrazovanje – čimbenik ubrzanog razvoja opće elektrifikacije

Početnom razvoju elektrotehnike, pa i same elektrifikacije, bitno su doprinijeli mnogi izumitelji, a rijetki su među njima bili visokoškolski obrazovani. Ističem britanskog izumitelja Michaela Faradaya koji nije bio formalno obrazovan, ali je bio izvrstan eksperimentator koji je svoja otkrića znao

---

<sup>205</sup> Isto, str. 856-857.

<sup>206</sup> I. Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878-1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, 2013., str. 191-192.

<sup>207</sup> *Progress in the art of metering electric energy I - Origins*, 1941., str. 424.

objasniti razumljivim jezikom. Međutim, tek je škotski fizičar James Clerk Maxwell, na temelju njegovih laboratorijskih istraživanja, razvio teoriju elektromagnetizma. Veliki američki izumitelj Thomas Alva Edison formalno je školovanje prekinuo u dvanaestoj godini, a ni George Westinghouse, američki izumitelj i industrijalac, također, nije bio visokoškolski obrazovan. To nije bio ni Nikola Tesla jer je prekinuo četverogodišnji studij započet u Grazu, a to nije bio studij elektrotehnike. Za razliku od njih, npr. profesor Galileo Ferraris i Michael von Dolivo-Dobrowolsky bili su visokoškolski obrazovani.

Prva dva desetljeća elektrifikacije obilježilo je nekoliko valova pionira. Prvi su bili tvorci DC sustava predvođeni Edisonom, zatim dolazi skupina tvoraca jednofaznih AC sustava i na kraju tvorci višefaznih AC sustava. Nakon toga slijedila je skupina izumitelja i elektroinženjera koji su završili studije na visokoškolskim ustanovama i potom pohađali elektrotehničke tečajeve. Tako obučeni, ti su ljudi doprinijeli brzom profesionalizaciji elektrotehnike. Na taj je način ubrzana opća elektrifikacija, koju su pioniri elektrifikacije započeli tijekom 1890-ih godina. Obrazovanje i tečajevi na tehničkim visokim školama i tehničkim sveučilišnim studijima organizirani su na temelju znanja i iskustva pionira, a tehnički časopisi i skupovi prenosili su znanstvene i stručne spoznaje. Osposobljavanje i obrazovanje električara, inženjera i znanstvenika, koji su popunjavali sve veći broj radnih mjesta u elektrotvrtkama, odvijalo se na mnogim razinama i na mnogo načina tijekom prva dva desetljeća razvoja električne rasvjete i napajanja.<sup>208</sup>

U Njemačkoj je Werner von Siemens, utjecajna osoba u inženjerskoj i znanstvenoj zajednici, potaknuo obrazovanje profesora elektrotehnike i osnivanje katedri za elektrotehniku na svim tehničkim visokim školama, kako bi se mladi ljudi upoznali s elektrotehničkom teorijom i praksom. Potaknuta time, Tehnička visoka škola u Darmstadtu je 1882. godine imenovala Erasmusa Kittlera za prvog profesora elektrotehnike u Njemačkoj, a on je, pak, osnovao prvu katedru za elektrotehniku.<sup>209</sup> Zapravo, 1882. godine, u Darmstadtu, na temelju odluke pokrajinske vlade, na Tehničkoj visokoj školi u Darmstadtu odobreno je zapošljavanje jednog profesora elektrotehnike te je osnovan elektrotehnički institut. Na Tehničkoj visokoj školi u Darmstadtu, 1882. godine započeo je s radom prvi zasebni studij elektrotehnike na svijetu.<sup>210</sup> Taj su primjer ubrzo slijedili i drugi u Europi i Sjevernoj Americi. Tehnološki institut u Massachusettsu (MIT) započeo je s prvim četverogodišnjim studijem elektrotehnike u Americi 1882. godine. Međutim, ovaj je studij administrativno

---

<sup>208</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 141-142.

<sup>209</sup> Isto, 144-145.

<sup>210</sup> G. Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, 2008., str. 43.

bio dio nastavnog programa fizike, a profesor Charles Cross, voditelj odjela za fiziku, planirao ga je i usmjeravao. Zasebni odjel elektrotehnike osnovan je tek 1902. godine.<sup>211</sup> O važnosti tehničkog obrazovanja govori i to da se brza industrijalizacija Njemačke krajem devetnaestog stoljeća, uključujući impresivan uspon njene elektroindustrije, djelomično pripisuje njemačkom sustavu srednjeg, zanatskog i tehničkog obrazovanja izvan visokoškolskih ustanova.<sup>212</sup>

Osim škotskog fizičara Jamesa Clerka Maxwella i njemačkog profesora Erasmusa Kittlera, kao profesore koji su značajno doprinijeli općoj elektrifikaciji svijeta i teorijskom razumijevanju elektromagnetskih pojava, navest ću samo profesore Sylvanusa P. Thompsona, Johna Hopkinsona i Charlesa P. Steinmetza. Sylvanus Thompson autor je vrlo utjecajnih knjiga iz elektrotehnike i bio je dugogodišnji ravnatelj londonskog Finsbury Technical Collegea. John Hopkinson bio je jedan od važnih tvoraca inženjerske teorije i konzultant Edisonovih tvrtki u Engleskoj, te je 1890. godine izabran za prvog šefa katedre za elektrotehniku na londonskom King's Collegeu. Dva puta je bio predsjednik britanske elektrotehničke organizacije Institution of Electrical Engineers (IEE). Charles Steinmetz bio je matematičar, elektroinženjer, izumitelj i profesor na Union Collegeu u Schenectadyju, u američkoj saveznoj državi New York, dok je istovremeno bio elektroinženjer u tvrtki General Electric, kojoj je prodao svoje patente. U svojim knjigama i člancima iz elektrotehnike, prvi je matematički opisao pojavu histereze i vrtložne struje – dva ključna uzroka neučinkovitosti električnih strojeva; razvio je fazorski račun (simboličku metodu); razvio je teoriju za harmonijsku i tranzijentnu analizu strujnih krugova te napravio nadomjesnu šemu asinkronog motora.

Steinmetzova primjena matematike u rješavanju problema AC strojeva i AC strujnih krugova bila je posebno poučna za inženjere jer je svoje rezultate opisao na razumljiv način. Nakon što se pridružio tvrtki General Electric, postao je član računskog odjela tvrtke; surađivao je s tvrtkom General Electric do svoje smrti. Njegov rad je u očima mnogih američkih inženjera postao simbol uspješnog znanstvenog inženjerskog istraživanja i razvoja. Prijenos energije na velike udaljenosti bio je jedan od istraživačkih problema kojim se godinama predano bavio.<sup>213</sup>

## Zaključak

Opću elektrifikaciju svijeta omogućili su mnogi znani i neznani izumitelji, tehničari, inženjeri i znanstvenici. Tri važna izuma ili otkrića koja su prethodila

---

<sup>211</sup> T. P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, 1983., str. 145.

<sup>212</sup> Isto, str. 142.

<sup>213</sup> Isto, str. 164.

razvoju elektrotehnike pa i same elektrifikacije svijeta bili su: Aragoov rotacijski disk iz 1824. godine, Faradayevo otkriće zakona elektromagnetske indukcije 1831. godine i konstrukcija prvog jednofaznog AC generatora 1832. godine. Nažalost, tada se izmjenična struja nije mogla iskoristiti pa je Hippolyte Pixii svom jednofaznom AC generatoru dodao kolektor (komutator) i pretvorio ga u DC generator. Prva poznata praktična primjena izmjenične struje dogodila se tek 1855. godine i to na području elektroterapije.

Sve do pred kraj 19. stoljeća dominirali su i razvijali se DC sustavi. Francuski elektroinženjer Hippolyte Fontaine je 1873. godine prvi prenio električnu energiju od DC generatora do DC motora, koji su bili povezani električnim kabelom. Edisonov izum praktične električne rasvjete sa žarnom niti 1879. godine bio je pokretačka snaga za uspjeh Edisonovih komercijalnih niskonaponskih DC prijenosnih sustava kratkog dometa u SAD-u i drugdje, počevši od 1882. godine.

Da bi se razvili jednofazni AC prijenosni sustavi, morali su se konstruirati jednofazni sinkroni AC generatori i jednofazni transformatori. Do 1868. godine konstruirani su stabilni jednofazni AC generatori, nastali preinakom DC generatora. Vrlo važnu ulogu u povijesti elektrifikacije odigrao je Gaulard-Gibbsov eksperimentalni jednofazni AC prijenosni sustav Torino-Lanzo iz 1884. godine. Taj je sustav bio nepraktičan, ali je potakao mnoge druge izumitelje da iznađu bolja rješenja. Dvije su velike mane ovog sustava bile to što su primarni namoti transformatora bili povezani serijski i to što su transformatori (tzv. sekundarni generatori) imali otvorenu željeznu jezgru. Te su obje mane otklonili ZBD jednofazni transformatori i ZBD prijenosni sustav mađarske tvrtke Ganz, koji su prvi put javno prikazani 1885. godine. ZBD jednofazni AC prijenosni sustavi od 1886. godine počeli su se natjecati s Edisonovim DC sustavima u Europi, a istovrsni su se AC prijenosni sustavi tvrtke Westinghouse (kopija ZBD prijenosnog sustava) počeli natjecati s Edisonovim DC sustavima u SAD-u. Ovi su jednofazni AC prijenosni sustavi bili sveprisutni do 1890. godine, a nastali su nekoliko godina prije podnošenja Teslinih patentnih prijava za višefazne AC strojeve i višefazni AC prijenosni sustav.

Kao početak komercijalne elektrifikacije u Hrvatskoj može se uzeti početak elektrifikacije riječke luke početkom 1891. godine. Prvi jednofazni AC prijenosni vod u Hrvatskoj izgrađen je 1895. godine od HE Krke (Jaruge 1) do Šibenika. Bio je to **dvostruki jednofazni** AC vod od HE Krke do Šibenika, dug 11 kilometara, koji je pušten je u pogon 28. kolovoza 1895. godine. To je bio prvi jednofazni AC prijenosni vod visokog napona, ako se ne računa, mnogo kraći jednofazni AC prijenosni vod, napona 2 kV, izgrađen u Rijeci.

Opća je elektrifikacija bila veliki pothvat za koji su nesumnjivo bili zaslužni izumitelji, ali još su više bili zaslužni financijeri i industrijalci koji su osnovali prve elektrotvrtke. Međutim, ne treba zaboraviti ni važnu ulogu tvrtki koje su financirale izgradnju jednofaznih, dvofaznih i trofaznih AC elektrana i AC

prijenosnih sustava, prvenstveno radi električnog napajanja svojih tvornica. Dvofazni AC prijenosni sustavi bili su samo loš pokušaj da se iznađe optimalan višefazni AC prijenosni sustav.

Michael von Dolivo-Dobrowolsky je 1889. godine konstruirao prvi trofazni suhi transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom, a zahvaljujući ispitivanjima Charlesa E. L. Browna, za izolaciju namota i hlađenje transformatora počelo se koristiti ulje. Danas se u Europi masovno koriste trofazni uljni transformatori, dok se u SAD-u, umjesto trofaznih transformatora, koristi sustav od tri jednofazna uljna transformatora.

Početkom svibnja 1887. godine Charles S. Bradley prijavio je patent za dvofazni sinkroni AC generator i motor te za dvofazni prijenos izmjenične struje između strojeva preko četiri vodiča. Prvi trofazni sinkroni AC generator konstruirao je August Haselwander 1887. godine te je prvi osmislio trofazni prijenos električne energije s trofaznim sinkronim AC strojevima i tri fazna vodiča. Prvi je napravio takav sustav i prvi ga je koristio u praksi.

Za izum i konstrukciju asinkronog AC motora najzaslužniji su izumitelji: Walter Baily, Galileo Ferraris, Charles S. Bradley, Michael von Dolivo-Dobrowolsky i Nikola Tesla, a gotovo svi patentni nakon sudskih sporova pripali su Nikoli Tesli. Američki su sudovi 1903. godine bili pravomoćno presudili da je Galileo Ferraris izumitelj jednofaznog asinkronog AC motora, ali su u protupravno pokrenutom novom istovrsnom sudskom sporu pravomoćno presudili 1905. godine da je Nikola Tesla izumitelj te inačice AC motora. Naime, tužitelj George Westinghouse, vlasnik predmetnih Teslinih patenata, bio je politički vrlo moćan. Prve trofazne kavezne i kliznokolutne asinkrone AC motore, upotrebljive u industriji, konstruirao je Michael von Dolivo-Dobrowolsky 1889. godine, ali su mu prihvaćeni patentni samo za rotor stroja.

Nakon Teslinih patenata prihvaćenih 1. svibnja 1888. godine, 1891. se godine dogodio prvi pokazni trofazni AC prijenosni sustav Lauffen-Frankfurt, koji je električnu energiju uspješno prenio na udaljenost od 175 kilometara. Taj je sustav prikazan na Međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi u Frankfurtu. Bila je to veličanstvena pobjeda trofaznog AC prijenosnog sustava u tzv. ratu struja. Glavni tvorcii ovog sustava bili su Michael von Dolivo-Dobrowolsky i njegova tvrtka AEG iz Berlina te Charles E. L. Brown i njegova tvrtka MFO iz Züricha. Amerikanci, naravno, veći značaj daju prijenosnom sustavu između slapova Niagare i 30 kilometara udaljenog grada Buffala, puštenom u pogon tek u studenom 1896. godine. Međutim, kod tog su sustava generatori, koje je konstruirala tvrtka Westinghouse, bili dvofazni, a samo je prijenosni vod Niagara-Buffalo, koji je izgradila Edisonova tvrtka General Electric, bio trofazni jer je iskustvo iz Frankfurta pokazalo da je trofazni vod optimalno rješenje. U to vrijeme George Westinghouse i Nikola Tesla smatrali su dvofazne sustave boljim od trofaznih.

Početnom razvoju elektrifikacije bitno su doprinijeli mnogi izumitelji – rijetki su među njima bili visokoškolski obrazovani – a nakon toga su glavna pokretačka snaga postali elektroinženjeri koji su završili studije na visokoškolskim ustanovama i potom pohađali elektrotehničke tečajeve. Značajnu ulogu imali su i visokoškolski profesori koji su napisali važne knjige te znanstvene i stručne članke iz elektrotehnike. Krajem 19. stoljeća, obrazovanje je postalo važan čimbenik ubrzanog razvoja elektrifikacije.

## Literatura

- [1] Cristopher Cooper, *The Truth About Tesla – The Myth of the Lone Genius in the History of Innovation*, Race Point Publishing, New York, 2015.
- [2] Nikola Tesla, *Moji pronalasci – My Inventions*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [3] Marc J. Seifer, *Wizard – The Life and Times of Nikola Tesla, Biography of a Genius*, Citadel Press, New York, 1998.
- [4] Margaret Cheney, Robert Uth, *Tesla – Master of Lightning*, MetroBooks, New York, 2001.
- [5] Robert Lomas, *The Man Who Invented the Twentieth Century – Nikola Tesla, Forgotten Genius of Electricity*, Headline Book Publishing, London, 1999.
- [6] W. Bernard Carlson, *Tesla – Izumitelj električnog doba*, Planetopija, Zagreb, 2014.
- [7] Nikola Tesla, A Machine to End War, *Liberty*, February 1935., pp. 5-7., <https://www.tumblr.com/drnikolatesla/612879822679654400/a-machine-to-end-war>, preuzeto 2. ožujka 2023.
- [8] Robert G. Fleagle, The Audibility of Thunder, *The Journal of the Acoustical Society of America*, July 1949., Vol. 21, No. 4, pp. 411-412.
- [9] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, *Lightning – Physics and Effects*, University Press, Cambridge, 2003.
- [10] Silvanus P. Thompson, *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors*, E. & F. N. SPON, London, 1895.
- [11] Glenn S. Smith, Joseph Henry's Role in the Discovery of Electromagnetic Induction, *European Journal of Physics*, December 2016., Vol. 38, No. 1, pp. 1-18.
- [12] Stefano Selleri, Faraday-Neuman-Lenz Law of Induction or Zantedeschi-Neuman-Lenz Law of Induction?, *Radio Science Bulletin*, December 2017., No. 363, pp. 73-76.
- [13] Rachel Tiktinsky, L. Chen, Pamela Narayan, Electrotherapy – Yesterday, Today and Tomorrow. *Haemophilia*, April 2010., Vol. 16, No. 4, pp. 126-131.
- [14] Gerhard Neidhöfer, *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und Drehstrom – Anfänge*



*der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung – 2. Auflage*, VDE Verlag GMBH, Berlin, 2008.

- [15] Von Franz Hillebrand, Zur Geschichte des Drehstromes, *ETZ-A Elektrotechnische Zeitschrift Ausgabe A*, 1959., Vol. 80, No. 13, pp. 409-421. & No. 14, pp. 453-461.
- [16] Thomas P. Hughes, *Networks of Power – Electrification of Western Society, 1880-1930*, The Johns Hopkins University Press, London, 1983.
- [17] Péter Asztalos, *Product Development of the Century-Old Ganz Electric Works 1878-1978*, Ganz Electric Works, 1978.
- [18] Ildikó Antal, *A magyar villamosenergia-ipar kialakulása 1878–1895 (hrv. Razvoj mađarske elektroprivrede 1878.-1895.)*, MMKM Elektrotehnički muzej Mađarskog instituta za znanstvenu povijest, Budimpešta, 2013., [http://real.mtak.hu/30122/1/antalildiko\\_elektro\\_1kot\\_JO.pdf](http://real.mtak.hu/30122/1/antalildiko_elektro_1kot_JO.pdf), preuzeto 2. ožujka 2023.
- [19] Želimir Škarica, *Prvih sto godina hidroelektrane Miljacka*, HEP Proizvodnja d.o.o., Zagreb, 2006.
- [20] Walter Baily, A Mode of Producing Arago's Rotation, *Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical, Experimental and Applied Physics*, June 1879., pp. 115-119.
- [21] Galileo Ferraris, Rotazione elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate, *Il Nuovo Cimento*, Dicembre 1888., Vol. 23, pp. 246-263.
- [22] William Stanley, The Ferraris-Tesla Inventions - To the Editor of Electrical Review, *Electrical Review*, March 1903., Vol. 42, No. 12, pp. 397-428.
- [23] Benjamin G. Lamme, The Story of the Induction Motor, *Journal of the AIEE*, March 1921., Vol. 40, No. 3, pp. 203-223.
- [24] Andrew A. Halacsy, G. H. von Fuchs, Transformer Invented 75 Years Ago, *Electrical Engineering*, June 1961., Vol. 80, No. 3, pp. 404-407.
- [25] Friedrich Uppenborn, *History of the Transformer*, E. & F. N. SPON, London, 1889.
- [26] Adam Allerhand, A Contrarian History of Early Electric Power Distribution, *Proceedings of the IEEE*, April 2017., Vol. 105, No. 4, pp. 768-778.
- [27] Otto Mahr, *Die Entstehung der Dynamomaschine*, VDE Verlag GMBH, Berlin, 1941.
- [28] William Stanley, Alternating-Current Development in America, *Journal of the Franklin Institute*, June 1912., Vol. 173, No. 6, pp. 561-580.
- [29] Boris Markovčić, Ivan Prpić, Franjo Plic, Ante Busatto, *Razvoj elektrifikacije Hrvatske – 1. dio – Od početka elektrifikacije do 1945. godine*, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1984.
- [30] Nana Palinić, *125 godina električne energije u Rijeci*, HEP Distribucija d.o.o.,

Zagreb, DP Elektroprimorje Rijeka, Rijeka, 2006., str. 54.

- [31] Marijan Kalea, Boris Markovčić, Ivan Deronja, Zdravko Plander, Karlo Ožegović, Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj, *Energija*, 1995., Vol. 44, No. 5-6, str. 239-253.
- [32] Ninoslav Holjevac, Igor Kuzle, Prvi cjeloviti višefazni elektroenergetski sustav na svijetu – Krka Šibenik, *Annual of the Croatian Academy of Engineering*, Vol. 2019, 2019., No. 1, str. 162-174., <https://hrcak.srce.hr/238713>, skinuto 2. ožujka 2023.
- [33] Slavko Vujević, Počeci razvoja elektrifikacije u Europi i Sjevernoj Americi, I BI SVJETLO! Zbornik radova sa znanstvenog skupa povodom 100. obljetnice elektrifikacije Splita, Muzej grada Splita, Društvo prijatelja kulturne baštine Split, 2022., str. 381-436.
- [34] Josip Moser, *Šibensko munjivo – Crtice o izgradnji i korištenju prvog cjelovitog elektroprivrednog sustava u Hrvatskoj*, Gradska knjižnica Juraj Šižgorić, Šibenik, 1998.
- [35] Adam Allerhand, The Earliest Years of Three-Phase Power – 1891-1893, *Proceedings of the IEEE*, January 2020., Vol. 108, No. 1, pp. 215-227.
- [36] Tomislav Anić, Poduzeća SUFID i La Dalmatienne od osnutka do Drugog svjetskog rata: crtice iz elektrifikacije Šibenika i okolice, *Časopis za suvremenu povijest*, 2020., Vol. 52, No. 2, pp. 441-458. <https://doi.org/10.22586/csp.v52i2.10626>, skinuto 2. ožujka 2023.
- [37] Tonko Fagarazzi, Hidroelektrana Kraljevac 1912. u europskom kontekstu, *Omiški ljetopis*, 2014., No. 7, pp. 5-70.
- [38] Marijan Kalea, Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj do 1918. godine, pp. 59-80, *Stoljeće hrvatske elektroprivrede*, HEP d.d. Zagreb, Tiskara Kačić, Šibenik, 1995., str. 71.
- [39] Joško Barić, Izgradnja hidroelektrane na rijeci Jadro i elektrifikacija Splita, I BI SVJETLO! Zbornik radova sa znanstvenog skupa povodom 100. obljetnice elektrifikacije Splita, Muzej grada Splita, Društvo prijatelja kulturne baštine Split, 2022., str. 99-119.
- [40] *Stoljeće električne energije u Požegi 1912. – 2012.*, HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o. Zagreb, Denona d.o.o. Zagreb, Zagreb, 2012.
- [41] A. E. Moore, The history and development of the integrating electricity meter, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1935., Vol. 77, No. 468, pp. 851-859.
- [42] Progress in the art of metering electric energy I - Origins, *Electrical Engineering*, September 1941., Vol. 60, No. 9, pp. 421-427.

## **TRUTHS AND FALSE BELIEFS ABOUT EARLY ELECTRIFICATION IN EUROPE AND NORTH AMERICA**

**Summary:** This paper describes the early development of electrification in Europe and North America. The general electrification of the world has been made possible owing to many known and unknown inventors, technicians, engineers and scientists. Rarely is there only one inventor of any technical invention. General electrification occurred only at the end of the 19th century when three-phase AC transmission systems were developed, and this system was reached through the DC system and the single-phase AC transmission system. It was a great undertaking for which the inventors were undoubtedly responsible, but even more so the financiers and industrialists who founded the first electrical companies. However, we should not forget the important role of companies that financed the construction of single-phase, two-phase and three-phase AC power plants and AC transmission systems, primarily for the purpose of powering their factories. Two-phase AC transmission systems were only a just a bad attempt to find the optimal multiphase AC transmission system. No matter how strange it may seem, too little is known about the early electrification and there are many false beliefs about it, among them the false belief that Nikola Tesla was the only inventor of alternating current and the main creator of general electrification. There is also a widespread false belief that HPP Krka (Jaruga 1) was a two-phase AC power plant even it was a single-phase AC power plant. Many are convinced that the Adams hydroelectric power plant built at Niagara Falls was a three-phase AC power plant even it was a two-phase AC power plant.

**Keywords:** Europe, North America, early development, electrification, three-phase AC transmission system



Davorin Brkić

davorin.brkic@hotmail.com

## **Regresijska analiza i tzv. umjetna neuronska mreža na primjeru elektroenergetske mreže**

**Sažetak:** Rad matematički i teleološki opisuje primjenu dvaju alata na način koji bi mogao služiti u edukativne svrhe. Cilj je produbiti spoznaje o tim alatima i potaknuti njihovo korištenje. Prikazani su noviji odjeci vezani za primjenu umjetne inteligencije u kulturi. Na temelju primjene navedena dva alata napisan je zaključak, u kojem se dovodi u pitanje prevladavajuća analogija umjetne neuronske mreže s ljudskim mozgom i promišlja se o zamjeni te analogije tako da se problem demitologizira svodeći ga na matematički problem, koji bi se u edukacijskom procesu uspoređivao s regresijskom analizom. Učenike bi se pomoću poznate metode za regresijsku analizu upoznalo s njima nepoznatim metodama za umjetnu neuronsku mrežu, umjesto da se pomoću svima nepoznatih metoda rada mozga učenike uči njima nepoznatom načinu primjene umjetne neuronske mreže.

Započinje se od modela elektroenergetske mreže s tri čvora koji je preuzet iz literature. Izveden je i obrazložen matematički sustav koji opisuje tu mrežu. Dvije jednačbe za proračun te mreže su složene korištenjem gotovih jednačbi iz literature. Varijacije se rade na jednom od tri čvora (isporuka radne i induktivne snage u mrežu). Vrijednosti potencijala za odabrane vrijednosti snaga na čvorištima (uz nepromjenjive parametre mreže) su dobivene iz podataka i sustava jednačbi primjenom Gaussove iterativne metode. Iz tih podataka se načinjavaju dva modela za iznos potencijala na jednom čvoru. Jedan model je napravljen regresijskom analizom metodom najmanjih kvadrata, drugi umjetnom

neuronskom mrežom metodom povratnog rasprostiranja pogreške. Nisu rađene eksperimentalne potvrde na stvarnoj mreži.

**Ključne riječi:** umjetna neuronska mreža, regresijska analiza, proračun tokova snaga, modeliranje, umjetna inteligencija

## 1. Uvod

Širi društveni interes pobuđen je proizvodima koje daju neuronske mreže (*neural networks* ANN, *deep learning*, *artificial intelligence* AI): prepoznavanje lica (npr. za otključavanje mobitela, raspoznavanje klasičnih emotivnih izraza lica, *face recognition*), prepoznavanje znakova na slici na način da se iz njih stvori tekst (npr. skener s ugrađenim programom koji nakon skeniranja stranice s tekстом, iz elektroničkog PDF oblika omogućuje prebacivanje teksta u tekstualnu datoteku), prijevod s jednog jezika na drugi i izgovor na oba jezika (npr. s hrvatskoga na engleski i obratno uz oba izgovora, <https://translate.google.com/>), izvršavanje glasovnih naredbi (upute tijekom vožnje, traženje odgovora na postavljena pitanja - Siri, <https://www.apple.com/siri/>), tekstualni razgovor s umjetnom inteligencijom koja nastoji izvršiti kreativne zadatke (*large language models* LLMS, izrada sažetka iz teksta, stvaranje beletrističkih sadržaja, pisanje pjesama, odgovori na postavljena pitanja na koje se daju odgovori - na temelju sadržaja pretvorenog u brojeve za ugađanje neuronske mreže i na temelju povratnih informacija čovjeka kod dodatnog ugađanja modela i sl., <https://openai.com/blog/chatgpt> [9]), grafička analiza podataka iz Excel datoteke (*ChatGTP* 4 [9]), stvaranje uvjerljivih krivotvorina sa stvarnim osobama i u slici i u zvuku (*deep fake*), indikacije krivnje u sudskim postupcima (*Northpointe Suite Case Manager*, <https://www.equivant.com/northpointe-suite-case-manager/>), čovjekoliki roboti (npr. *Sophia*, <https://www.hansonrobotics.com/sophia/>), nadzor korisničke službe (npr. upozorenje zaposleniku ako sustav kod njega identificira ljutnju u glasu), automobili upravljani bez čovjeka i tako dalje.

Primjer u kulturi je dokumentarac *Is AI the future of humanity? - Artificial intelligence and its limitations* koji je objavio *Deutsche Welle* 24. svibnja 2023. (<https://www.youtube.com/watch?v=YZTutoSnXGc>), koji prikazuje primjene i mogućnosti umjetne inteligencije. Također je poticajan razgovor o velikim jezičnim modelima temeljenim na umjetnoj inteligenciji (LLMS) između stručnjaka za umjetnu inteligenciju Briana Roemmelea (r. x) i psihologa Jordana Petersona (r. 1962.) iz svibnja 2023. ([https://www.youtube.com/watch?v=S\\_E4t7tWHUY](https://www.youtube.com/watch?v=S_E4t7tWHUY)), gdje je Peterson zaključio da je alat tvrtke

OpenAI ChatGPT prošao *Turingov test* (nemogućnost razlikovanja umjetne inteligencija i čovjeka u dopisivanju)<sup>1</sup>.

Prethodno navedene primjene dovode do pojave zagovornika koji predviđaju različite scenarije u budućnosti, od futurističkih u kojima ove tehnologije vode čovječanstvo u distopijski scenarij, do scenarija gdje je ta tehnologija alat koji se kao i svaki drugi (npr. nuklearna energija) može zloupotrijebiti. *The Economist* (Ricardo Rey) je to ilustrirao tako da je na slovo *A* kod kratice *AI* stavio anđeoski veo a na slovo *I* vražji rep i rogove. U populaciji istraživača umjetne inteligencije napravljeno je 2022. istraživanje iz kojega proizlazi da njih 48% smatra da vjerojatnost za katastrofalne posljedice umjetne inteligencije {*extremely bad (eg, human extinction)*} iznosi 10%, 25% ih smatra da je vjerojatnost za to 0% dok je prosjek u toj populaciji za takav scenarij 5%. Stručnjaci imaju težnju za preuveličavanjem rizika [8]. Zgodno se sjetiti zastrašivanja stanovništva s primjenom izmjenične električne energije u XIX. stoljeću.

Osim navedenih, primjene su i u područjima koja ne pobuđuju, kao prethodno navedene primjene, toliko velik društveni interes. Jedno od tih područja je u elektroenergetici: sekundarna regulacija napona i jalove snage [3], prognoza satne potrošnje električne energije za sljedeći dan [4], određivanje vrste i mjesta kvara u elektroenergetskoj prijenosnoj mreži [7] i tako dalje.

U ovome radu su opisana dva naslovna alata, uz pripadne pomoćne alate za rješavanje konkretnog problema, koja su i primijenjena kako bi se s izgrađenim modelom oponašao odziv napona na promjenu toka energije na čvoru modela elektroenergetske mreže, s ciljem dobivanja primjera koji je potencijalno upotrebljiv za edukativne svrhe. Primijenjeni opis u radu za sve alate samodostatan je u smislu programske izvedbe. Za praktične primjene dostupni su već gotovi alati čije korištenje i ne zahtijeva poznavanje algoritama potrebnih za izradu modela (metode ugađanja parametara).

U rješavanju elektroenergetske mreže korišten je sadržaj knjige Marije Ožegović i Karla Ožegovića iz 1977. [1]. Za inspiraciju glede teorijskih i praktičnih umijeća u modeliranju kao djelatnosti (na primjeru elektrotehnike) je korišten rad Ivana Flegara iz 2019. [5]. Za idejni način računanja parametara umjetne neuronske mreže i za inspiraciju prilikom izrade grafičkih prikaza konzultirano je drugo poglavlje knjige Branka Novakovića, Dubravka Majetić i Mladena Širokog iz 1998. [2]. Izrađeni modeli u svim poglavljima su programirani u Matlabu. Izvedeni su na

---

<sup>1</sup> »...a remote human interrogator, within a fixed time frame, must distinguish between a computer and a human subject based on their replies to various questions posed by the interrogator. By means of a series of such tests, a computer's success at "thinking" can be measured by its probability of being misidentified as the human subject«, <https://www.britannica.com/technology/Turing-test>, pristup 5. 6. 2023.

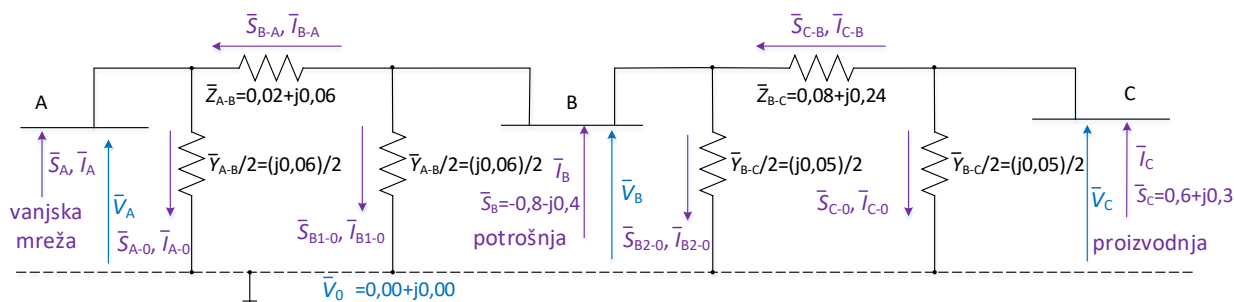
računalu »Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60 GHz 1.8 GHz« RAM-a 8 GB i u operativnom sustavu Windows 10 Pro.

## 2. Elektroenergetska mreža

Model elektroenergetske mreže. Zakonitosti u ovom potpoglavlju su poseban slučaj teorije elektromagnetskog polja. Općenito se mora u svakom konkretnom primjeru provjeriti jesu li s dovoljnom točnošću zadovoljeni uvjeti pod kojima vrijede postulati i »*primitivni pojmovi teorije električnih mreža*« [5]. Na slici 1. je model mreže s tri čvora i dva dalekovoda. Model je s impedancijama voda i vrijednostima snaga sa slike uzet iz [1]. Oba dalekovoda (od A do B i od B do C) modelirani su približnim »*pi-modelom*« (jedna impedancija i dvije poprečne admitancije) koji vrijedi za kraće vodove (za vod do 200 km greška 0,5%) [1]. Model se koristi za sinusoidne napone i struje frekvencije 50 Hz koje ne odstupaju od sinusnog oblika. O vanjskoj mreži na sabirnici A se zna da će nadoknaditi bilo manjak toka energije (snage) u mreži bilo preuzeti višak toka energije iz mreže (stanje mreže ovisi o vanjskoj mreži – otvoreni sustav).

Potrebni »*primitivni pojmovi teorije električnih mreža*« su:

- za (1) Kirchhoffov zakon za struje  $\{ \sum_l^m \bar{I}_l = 0$ , gdje je  $m$  zbroj svih struja u/iz čvora };
- za (2) Ohmov zakon  $\{ \bar{I}_{i-j} = (\bar{V}_i - \bar{V}_j) / \bar{Z}_{i-j} = (\bar{V}_i - \bar{V}_j) \cdot \bar{Y}_{i-j}$ , gdje je  $i \neq j$ ,  $\bar{I}_{i-j}$  struja koja teče iz čvora  $i$  u čvor  $j$ , a  $\bar{Z}_{i-j}$  impedancija kroz koju teče ta struja };
- za (3) zakonitost koja povezuje snagu, napon i struju  $\{ \bar{I}_{i-j} = (\bar{S}_{i-j} / (\bar{V}_i - \bar{V}_j)) \}^*$ , gdje je  $\bar{I}_{i-j}$  struja koja teče iz čvora  $i$  u čvor  $j$ ,  $\bar{V}_i$  i  $\bar{V}_j$  su pripadni potencijali, a  $\bar{S}_{i-j}$  pripadna prividna snaga,  $\bar{S}_{i-j} = P_{i-j} + j \cdot Q_{i-j}$  }, i
- za (4) i (5) zakonitost o bilanci snaga u pojedinom čvoru  $\{ \sum_l^m \bar{S}_l = 0$ , gdje je  $m$  broj svih prividnih snaga u(iz) čvora }.



Slika 1. Model mreže s parametrima mreže i tipičnim vrijednostima prividne snage na čvorovima B i C

Nepoznanice su struje  $\bar{I}_i$ , naponski potencijali  $\bar{V}_i$  i snaga  $\bar{S}_A$  na sučelju s vanjskom mrežom. Bilo koji potencijal u mreži se može proglasiti referentnim pa se odabire da je  $\bar{V}_0 = 0,00 + 0,00j$ . Negativni predznak izračunate struje će značiti da je smjer struje suprotan od naznačenog (npr. za  $\bar{I}_{C-B}$  iz B u C), što vrijedi i za tok energije (snage). Struja i radni tok energije koji ulaze u čvor imaju pozitivnu vrijednost.

$$+\bar{I}_A + \bar{I}_{B-A} - \bar{I}_{A-0} = 0, +\bar{I}_B + \bar{I}_{C-B} - \bar{I}_{B-A} - \bar{I}_{B1-0} - \bar{I}_{B2-0} = 0, +\bar{I}_C - \bar{I}_{C-B} - \bar{I}_{C-0} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{I}_{B-A} = \frac{\bar{V}_B - \bar{V}_A}{\bar{Z}_{A-B}}, \bar{I}_{C-B} = \frac{\bar{V}_C - \bar{V}_B}{\bar{Z}_{C-B}}, \bar{I}_{A-0} = (\bar{V}_A - \bar{V}_0) \cdot \bar{Y}_{A-0} / 2, \bar{I}_{B1-0} = (\bar{V}_B - \bar{V}_0) \cdot \bar{Y}_{A-B} / 2, \quad (2)$$

$$\bar{I}_{B2-0} = (\bar{V}_B - \bar{V}_0) \cdot \bar{Y}_{B-C} / 2, \bar{I}_{C-0} = (\bar{V}_C - \bar{V}_0) \cdot \bar{Y}_{B-C} / 2$$

$$\bar{S}_{B-A} = (\bar{V}_B - \bar{V}_A) \cdot \bar{I}_{B-A}^*, \bar{S}_{C-B} = (\bar{V}_C - \bar{V}_B) \cdot \bar{I}_{C-B}^*, \bar{S}_{A-0} = (\bar{V}_A - \bar{V}_0) \cdot \bar{I}_{A-0}^*, \bar{S}_{B1-0} = (\bar{V}_B - \bar{V}_0) \cdot \bar{I}_{B1-0}^*, \quad (3)$$

$$\bar{S}_{C-0} = (\bar{V}_C - \bar{V}_0) \cdot \bar{I}_{C-0}^*$$

$$+\bar{S}_B - \bar{S}_{B-A} - \bar{S}_{B1-0} - \bar{S}_{B2-0} + \bar{S}_{C-B} = 0$$

$$+\bar{S}_B + (\bar{V}_B - \bar{V}_A) \cdot \left( \frac{\bar{V}_B - \bar{V}_A}{\bar{Z}_{A-B}} \right)^* + (\bar{V}_0 - \bar{V}_B) \cdot \left[ \left( \frac{\bar{Y}_{A-B}}{2} + \frac{\bar{Y}_{B-C}}{2} \right) \cdot (\bar{V}_0 - \bar{V}_B) \right]^* + (\bar{V}_C - \bar{V}_B) \cdot \left( \frac{\bar{V}_C - \bar{V}_B}{\bar{Z}_{C-B}} \right)^* = 0 \quad (4)$$

$$+\bar{S}_A + \bar{S}_{B-A} - \bar{S}_{A-0} = 0$$

$$+\bar{S}_C - \bar{S}_{C-B} - \bar{S}_{C-0} = +\bar{S}_C + (\bar{V}_C - \bar{V}_B) \cdot \left( \frac{\bar{V}_C - \bar{V}_B}{\bar{Z}_{B-C}} \right)^* + (\bar{V}_0 - \bar{V}_C) \cdot \left[ \frac{\bar{Y}_{B-C}}{2} \cdot (\bar{V}_0 - \bar{V}_C) \right]^* = 0 \quad (5)$$

Iz sustava jednadžbi koji opisuje model mreže (1-5) nije moguće algebarskim preoblikovanjima jednadžbi izračunati nepoznanice ( $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C, \bar{V}_A, \bar{V}_B, \bar{V}_C$ ). Riječ je o sustavu bez jednoznačnoga rješenja (u smislu iznosa naponskih potencijala). Sustav sadrži nelinearne članove (npr.  $\bar{V}_B \cdot \bar{V}_B^*$ ). U praksi se s naponom na sabirnici može donekle upravljati (npr. regulacijskim transformatorom), pa on nije jednoznačno određen zadatostima iz modela (otvoreni sustav). Na sabirnici A se tako proizvoljno odabire potencijal u okviru potencijala koji se može pojaviti u praksi. Odabrani proizvoljni potencijal sabirnice A je  $\bar{V}_A = 1,06 + 0,00j$ , a tim odabirom sustav se pretvara u sustav s mogućim jednoznačnim rješenjem.

Za Gaussovu iterativnu metodu potreban je odgovarajući oblik jednadžbi [1, str. 375.]. Oblikovanje takvog zapisa za bilo koju mrežu (*»kuharica«*) je dan u [1]. Obrazlaganje tog



algoritma prelazi okvir ovoga rada. Iz tog algoritma proizlaze jednadžbe (6) i (7) složene korištenjem gotovih jednadžbi iz [1].

$$\bar{V}_B^k = 1,06 + (0,02 + j0,06) \cdot \left[ \left( \frac{\bar{S}_B}{\bar{V}_B^{k-1}} \right)^* - j0,055 \cdot \bar{V}_B^{k-1} \right] + (0,02 + j0,06) \cdot \left[ \left( \frac{\bar{S}_C}{\bar{V}_C^{k-1}} \right)^* - j0,025 \cdot \bar{V}_C^{k-1} \right], \bar{V}_B^k = f_B(\bar{V}_B^{k-1}, \bar{V}_C^{k-1}) \quad (6)$$

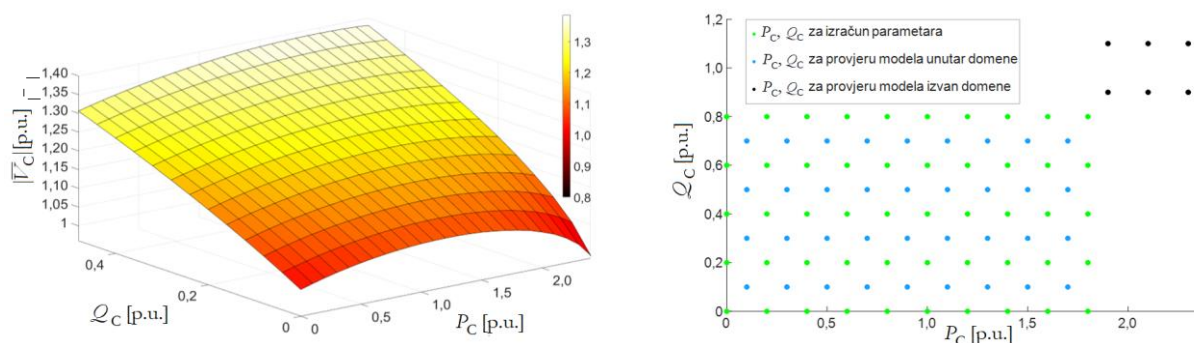
$$\bar{V}_C^k = 1,06 + (0,02 + j0,06) \cdot \left[ \left( \frac{\bar{S}_B}{\bar{V}_B^{k-1}} \right)^* - j0,055 \cdot \bar{V}_B^{k-1} \right] + (0,10 + j0,30) \cdot \left[ \left( \frac{\bar{S}_C}{\bar{V}_C^{k-1}} \right)^* - j0,025 \cdot \bar{V}_C^{k-1} \right], \bar{V}_C^k = f_C(\bar{V}_B^{k-1}, \bar{V}_C^{k-1}) \quad (7)$$

Gaussova iterativna metoda. Oblik jednadžbi (6) i (7) sadrži eksplicitnu zavisnost svakog potencijala o nepoznatim potencijalima (i o sebi samom). Tako izražen oblik  $\{ \bar{V}_B^k = f_B(\bar{V}_B^{k-1}, \bar{V}_C^{k-1}), \bar{V}_C^k = f_C(\bar{V}_B^{k-1}, \bar{V}_C^{k-1}) \}$  gdje je  $k$  broj iteracije } različit je od općeg iskaza za metodu u [1 str. 375.] jer tamo izražena vrijednost ne ovisi o sebi samoj. Taj oblik omogućava primjenu metode. S njim je jednostavnije opisati iterativni postupak u odnosu na [1].

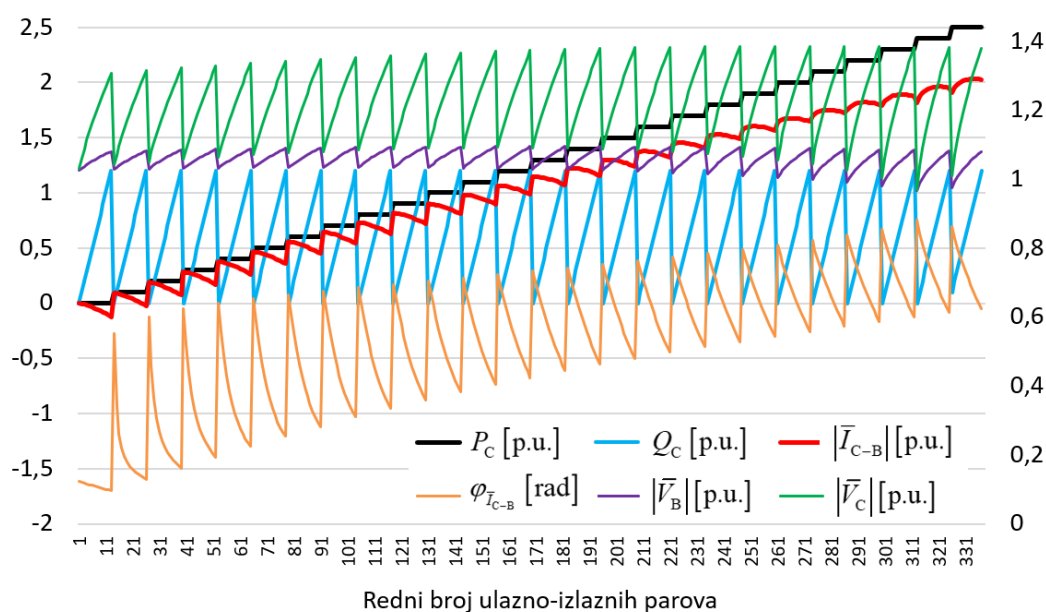
U nultoj iteraciji ( $k=0$ ) se postavljaju proizvoljne vrijednosti potencijala sabirnica B i C,  $\bar{V}_B^0 = \bar{V}_C^0 = 1,00 + 0,00j$ . Iz potencijala nulte iteracije, dostupnih prividnih snaga i jednadžbi (6-7) se u prvoj iteraciji ( $k=1$ ) izračunavaju potencijali u sljedećoj iteraciji:  $\bar{V}_B^1 = f_A(\bar{V}_B^0, \bar{V}_C^0)$ ,  $\bar{V}_C^1 = f_C(\bar{V}_B^0, \bar{V}_C^0)$ . U drugoj iteraciji ( $k=2$ ) se ponavlja postupak s potencijalima iz prošle iteracije  $\bar{V}_B^2 = f_B(\bar{V}_B^1, \bar{V}_C^1)$ ,  $\bar{V}_C^2 = f_C(\bar{V}_B^1, \bar{V}_C^1)$ . Postupak se ponavlja u svakoj sljedećoj iteraciji sve dok se ne dobije zadovoljavajuće rješenje {dovoljno male razlike u potencijalima u susjednim iteracijama,  $\Delta V_i = ||\bar{V}_j^k| + |\bar{V}_j^{k-1}|| < \varepsilon$ , za svaki  $j$ , B i C, korišteni  $\varepsilon = 0,0005$  prema [1]}. Proračun se prekida ako se ne postiže približavanje točnom rješenju, što se događa kada za svaki  $j$  nije ispunjen uvjet  $||\bar{V}_j^{k+1}| - |\bar{V}_j^k|| < ||\bar{V}_j^k| - |\bar{V}_j^{k-1}||$ .

Kada se izračunaju potencijali  $\bar{V}_B$  i  $\bar{V}_C$  jednostavno je izračunati sve struje, snage i napone korištenjem jednadžbi (1-3).

Primjena. Podaci (prividna snaga  $\bar{S}_C$ ) za simulacije su stvoreni u zadanim koracima »for petljama«. Svi ostali inputi (parametri mreže, napon  $\bar{V}_A$ , snaga  $\bar{S}_B$ ) u mreži se ne mijenjaju. Nakon toga je primijenjen prethodno opisan iterativni postupak kako bi se odredili potencijali (izračunati napon  $|\bar{V}_C|$ , slika 2. lijevo). Izračun za 337 točaka trajao je 10,8 sekundi (opcija »tic« i »toc« u Matlabu). Neke od tih vrijednosti se koriste kao inputi za izračun parametara i ocjenu modela kod dvaju naslovnih alata (slika 2. desno, slika 3.).



Slika 2. Trodimenzionalni prikaz domene i kodomene (rezolucija 0,1 p.u., nacrtano sa »surf« u Matlabu) te dvodimenzionalni prikaz vrijednosti domene



Slika 3. Iznosi pojedinih veličina u konkretnom problemu (za napone je desna ordinata)

### 3. Regresijska analiza

Opći višedulazni i višestupanjski model. Za regresijsku analizu (engl. *regression analysis*) treba odabrati model. Za način izračuna parametara modela ( $\alpha, \beta_{1,i}, \beta_{2,i}, \dots, \beta_{K,i}$  za svaki  $i$ ) metodom najmanjih kvadrata (engl. *least-squares method*) pogodni su modeli određenih svojstava. Pogodni su samo modeli koji prenose dobra svojstva funkciji cilja  $FC_{ra}$  (9). Funkcija cilja se u toj metodi parcijalno derivira po svim parametrima i sve se te derivacije izjednače s nulom. Funkcija cilja ima dobra svojstava ako je takva da nakon tih parcijalnih derivacija daje rješiv sustav  $n$  jednadžbi s  $n$  nepoznanica (npr. uz model  $y_t = \alpha \cdot \beta^{x_t} \cdot \varepsilon_t$ ,  $\ln y_t = \ln \alpha + x_t \cdot \ln \beta + \ln \varepsilon_t$ ). Nada je da će to to rješenje dati minimum funkcije  $FC_{ra}$ . To je školski način traženja lokalnih i/ili globalnih minimalnih/maksimalnih vrijednosti (ekstrema) funkcije u matematici. Već se u srednjoj školi uči

traženje ekstrema derivacijom funkcije koja ima jednu varijablu (dvodimenzionalni sustav). Derivacija funkcije u dvodimenzionalnom sustava daje nagib tangente koji je jednak nuli samo u točki ekstrema, stoga se kod traženja ekstrema (npr. minimuma funkcije) traži upravo ta točka (npr. točka III. na slici 7. ekstrem je funkcije  $FC_{nm}$  i u njoj je nagib tangente/derivacija jednaka nuli, drugim riječima zelena crta je vodoravna, za razliku od svih drugih točaka označenih rimskim brojevima). Slično mora vrijediti u višedimenzionalnim prostorima, recimo, u trodimenzionalnom prostoru  $z = f(x, y)$  projekcija funkcije  $f$  u točki ekstrema na  $z$ - $x$  ravninu ima parcijalnu derivaciju po varijabli  $x$  odnosno nagib tangente jednak nuli iliti tangentu paralelnu s  $x$  osi, kao što i projekcija te točke u  $z$ - $y$  ravnini ima vodoravnu tangentu paralelnu s  $y$  osi. Ta dva pravca (tangente) zajedno definiraju tangencijalnu ravninu paralelnu s  $x$ - $y$  ravninom. Gleda li se nogometna lopta kojoj je podloga  $x$ - $y$  ravnina, jedan od dva ekstrema loptaste trodimenzionalne funkcije bio bi najviša točka lopte. Ravnina koja sadržava dvije tangente (iz projekcija na  $z$ - $x$  i  $z$ - $y$  ravninu) u toj najvišoj točki sadržavala bi i papir koji bi vodoravno stavili na vrh te lopte.

Za model s proizvoljnim brojem ulaza  $x_j$  (najveći  $j$  jest  $K$ ) i s proizvoljnim stupnjevima polinoma  $i$  pojedinog ulaza (za  $x_{j,t}$  najveći stupanj polinoma  $i$  je  $N_j$ ) odabire se opći model (8).

$$y_t = f(x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{K,t}) = \alpha + \sum_{i=1}^{N_1} \beta_{1,i} \cdot x_{1,t}^i + \sum_{i=1}^{N_2} \beta_{2,i} \cdot x_{2,t}^i + \dots + \sum_{i=1}^{N_K} \beta_{K,i} \cdot x_{K,t}^i \quad (8)$$

gdje su:

- $y_t$  vrijednost izlaza (kodomene) u točki domene  $t$ ,
- $x_{j,t}$  vrijednost ulaza  $j$  u točki domene  $t$ ,
- $N_j$  odabrani stupanj polinoma ulaza  $x_j$ ,
- $\alpha$  vrijednosti izračunljivog parametara modela, a
- $\beta_{j,i}$  je vrijednost izračunljivog parametra modela koji se nalazi uz ulaz  $x_j$  na stupnju polinoma  $i$ .

Metoda najmanjih kvadrata. Uz odabrani model potrebno je odrediti parametre  $(\alpha, \beta_{j,i})$ . Prije toga je potrebno definirati funkciju cilja čiji optimum je potrebno pronaći ( $FC_{ra}$ ). Traženje tog optimuma podrazumijeva traženje vrijednosti parametara  $(\alpha, \beta_{j,i})$  uz koje će vrijednost te funkcije biti najbolja (npr. najmanji  $FC_{ra}$ ). Pritom je tipičan način odabrati zbroj kvadrata razlike pogreške modela  $\hat{e}_{t,ra}$ . Tu se pogreška modela definira kao razlika između: vrijednosti kodomene  $y_t$ , i modela  $\hat{y}_t$  koji ima neodređene koeficijente  $(\alpha, \beta_{j,i})$  a u kojega su ubačene vrijednosti domene  $x_{j,t}$ . Funkcija cilja je u (9). Poznate su za neku točku  $t$  brojčane vrijednosti parova: izlaz  $y_t$  (kodomene) i svaki  $j$ -ti ulaz  $x_{j,t}$  (domena). U jednadžbi je  $N$  broj domensko-kodomenskih parova za izračun parametara. Par u točki  $t$  ( $t=1,2,\dots,N$ ) je:  $x_{j,t}$  ( $j=1,2,\dots,K$ ) i  $y_t$ .

$$FC_{ra} = \sum_{t=1}^N \hat{e}_{ra,t}^2 = \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2 = \sum_{t=1}^N \left[ y_t - f(x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{K,t}) \right]^2 = \sum_{t=1}^N \left[ y_t - \left( \alpha + \sum_{i=1}^{N_1} \beta_{1,i} \cdot x_{1,t}^i + \sum_{i=1}^{N_2} \beta_{2,i} \cdot x_{2,t}^i + \dots + \sum_{i=1}^{N_K} \beta_{K,i} \cdot x_{K,t}^i \right) \right]^2 \quad (9)$$

Tu dakle preostaje funkciju cilja  $FC_{ra}(\alpha, \beta_{j,t})$  derivirati po svim parametrima ( $\alpha, \beta_{1,i}, \beta_{2,i}, \dots, \beta_{K,i}$  za svaki  $i$ ) i nakon toga sve te derivacije izjednačiti s nulom (10). Time se dobiva sustav jednačbi, s kojim je, uz opći model, jednostavno (*»šablonski«*) izračunati sve parametre modela.

$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \alpha} = 0, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{1,1}} = 0, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{1,2}} = 0, \dots, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{1,N_1}} = 0, \dots, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{K,1}} = 0, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{K,2}} = 0, \dots, \frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{K,N_j}} = 0 \quad (10)$$

Nakon izračuna parametara se provjerava kvaliteta modela (npr. koeficijentom determinencije, statističkim testovima). U ovome radu će se model testirati usporedbom prethodno izračunatih vrijednosti Gaussovom metodom, s izračunatim podacima dobivenima regresijskim modelom. Inače, u teoriji, parcijalne derivacije koje se ovdje provode podrazumijevaju međusobnu nezavisnost varijabli  $x_j$ . Za model u praksi bitno je poklapanje sa stvarnošću (*whatever works*). Produbljivanje razumijevanja o statističkim testovima provjere parametara prelazi okvir rada.

Primjena. Za konkretnu mrežu glede iznosa potencijala na čvoru C ( $\hat{y}_t = \hat{V}_{C,t}$ ) je odabran opći model koji ovisi o injekciji radnog toka energije  $P_C(x_{1,t}=P_{C,t})$  i induktivnog toka energije  $Q_C(x_{2,t}=Q_{C,t})$  u taj čvor (11). Sve druge vrijednosti u modelu su nepromjenjive. Pripadna funkcija cilja  $FC_{ra}$  je u (11). U jednačbi (11) je  $y_t = V_{C,t} = |\bar{V}_{C,t}|$ .

$$\begin{aligned} \hat{V}_{C,t} &= f(P_{C,t}, Q_{C,t}) = \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \\ FC_{ra} &= \sum_{t=1}^{152} (y_t - \hat{y}_t)^2 = \sum_{t=1}^{152} (V_{C,t} - \hat{V}_{C,t})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Nakon deriviranja izraza po svakoj od pet varijabli dobije se sustav pet jednačbi s pet nepoznanica (12-16). Njega je jednostavno riješiti u jednom koraku uz poznavanje svih parova domene ( $P_{C,t}, Q_{C,t}$ ) i kodomene ( $V_{B,t}$ ) u točkama  $t$ . Trajanje izračuna parametara u izrađenom programu je 2,5 sekunde.

$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \alpha} = \sum_{t=1}^{50} \left\{ 2 \cdot \left[ V_{C,t} - \left( \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \right) \right] \cdot (-1) \right\} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{1,1}} = \sum_{t=1}^{50} \left\{ 2 \cdot \left[ V_{C,t} - \left( \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \right) \right] \cdot (-P_{C,t}) \right\} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{1,2}} = \sum_{t=1}^{50} \left\{ 2 \cdot \left[ V_{C,t} - \left( \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \right) \right] \cdot (-P_{C,t}^2) \right\} = 0 \quad (14)$$

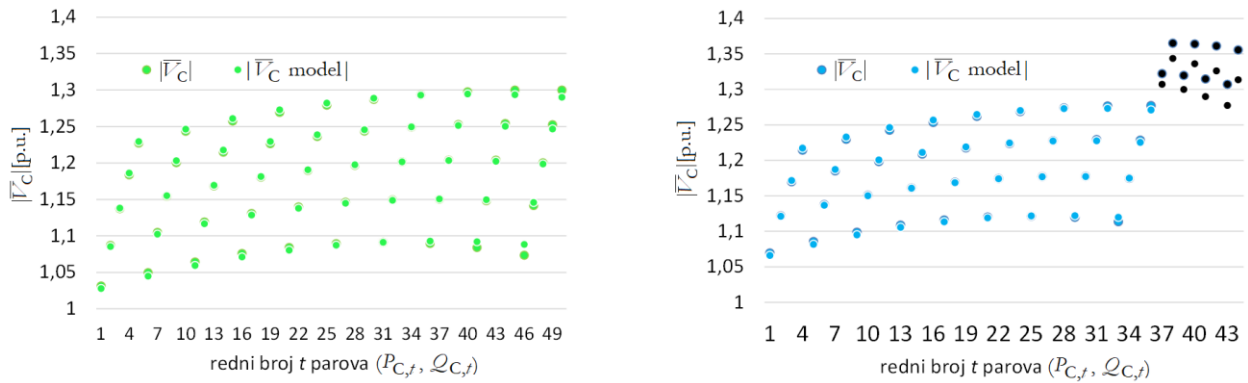
$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{2,1}} = \sum_{t=1}^{50} \left\{ 2 \cdot \left[ V_{C,t} - \left( \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \right) \right] \cdot (-Q_{C,t}) \right\} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\delta FC_{ra}}{\delta \beta_{2,2}} = \sum_{t=1}^{50} \left\{ 2 \cdot \left[ V_{C,t} - \left( \alpha + \beta_{1,1} \cdot P_{C,t} + \beta_{1,2} \cdot P_{C,t}^2 + \beta_{2,1} \cdot Q_{C,t} + \beta_{2,2} \cdot Q_{C,t}^2 \right) \right] \cdot (-Q_{C,t}^2) \right\} = 0 \quad (16)$$

Nakon rješavanja sustava dobivaju se izračunati parametri modela čija jednačba je u (17). Parametri uz induktivnu snagu veći su 3,9 i 1,8 puta od parametara uz radnu snagu (veći utjecaj na napon).

$$|\bar{V}_C| = 1,0279 + 0,0915 \cdot P_C - 0,0321 \cdot P_C^2 + 0,299 \cdot Q_C - 0,0592 \cdot Q_C^2, \quad R^2 = 0,997 \quad (17)$$

Na slici 4. lijevo vidljivo je izvrsno poklapanje ranije izračunatog potencijala prema Gaussovoj metodi i izračunatog potencijala s regresijskim modelom za točke na kojima su računati parametri (zelene točke na toj i na slici 2. desno). Na slici 4. desno je vidljivo izvrsno poklapanje ranije izračunatog potencijala prema i izračunatog potencijala s modelom za točke unutar domene za koje su računati parametri (plave točke na toj i na slici 2. desno). Te plave točke nisu korištene u izračunu parametara, ali je poklapanje jednako dobro, što pokazuje dobre interpolacijske sposobnosti modela. Na slici 4. desno je vidljivo ne tako dobro poklapanje izračuna na podacima izvan domene na kojoj su računati parametri modela (crne točke na toj i na slici 2. desno). Najveće apsolutno odstupanje je 0,04 u odnosu na napon od 1,36. Prema tome model može ekstrapolirati, ali je potreban oprez.



Slika 4. Izračunati potencijali Gaussovom metodom uspoređeni s izračunatim potencijalom regresijskim modelom uz iste ulaze (slika 2. desno s dosljedno korištenim bojama točaka t)

#### 4. Umjetna neuronska mreža

Opći model umjetne neuronske mreže. Umjetna neuronska mreža (engl. *artificial neural network*) može se zamisliti kao jedna nezgrapna funkcija standardne strukture s odabranim brojem neodređenih parametara (stotinama, tisućama, neuronska mreža *Chat GPT-3* ima 175 milijardi

parametara<sup>2</sup> i sl.). To je funkcija koja može imati više ulaznih i više izlaznih vrijednosti. Nakon što se izračunaju njeni parametri može se gledati kao crna kutija s ulazima i izlazima (engl. *black box*). Umjetna neuronska mreža u primjeru je prikazana na slici 5. u plavom osjenčanom okviru »Umjetna neuronska mreža«.

Na slici su: podfunkcije (»*neuroni*«) crvene boje, ulazi i izlazi plave boje, parametri u žutim kružićima. Ona ima tri sloja neurona (općenito ih može imati više, u informatičkom rješenju je broj fiksiran na tri). Broj podfunkcija u prvom sloju je tri (može ih biti manje ili više, općenito  $K_1$ ), u drugom sloju dva (može ih biti općenito  $K_2$ ), broj podfunkcija u zadnjem sloju određen je brojem izlaza (na slici: dvije podfunkcije zbog dva izlaza). Mreža sadrži dva tipa inputa: ulaze u kružićima » $x_1$ « i » $x_2$ « (broj im može biti proizvoljan, ovisno o problemu koji se rješava) i parametre mreže u kružiću » $v_{m_1 m_2}, u_{n_1 n_2}, w_{l_1 l_2}, a_{o_1 o_2}, b_{q_1 q_2}$ «. Izlazi su » $\hat{y}_1$ « i » $\hat{y}_2$ «.

Za umjetnu neuronsku mrežu se na skupu dostupnih ulaza ( $x_{1,t}, x_{2,t}, t=1,2,\dots,N$ ) i izlaza ( $y_{1,t}, y_{2,t}, t=1,2,\dots,N$ ) odrede parametri ( $v_{m_1 m_2}, u_{n_1 n_2}, w_{l_1 l_2}, a_{o_1 o_2}, b_{q_1 q_2}$ ) iterativnom metodom. Nakon toga se parametri više ne mijenjaju i mreža može ići u primjenu za konkretni zadatak.

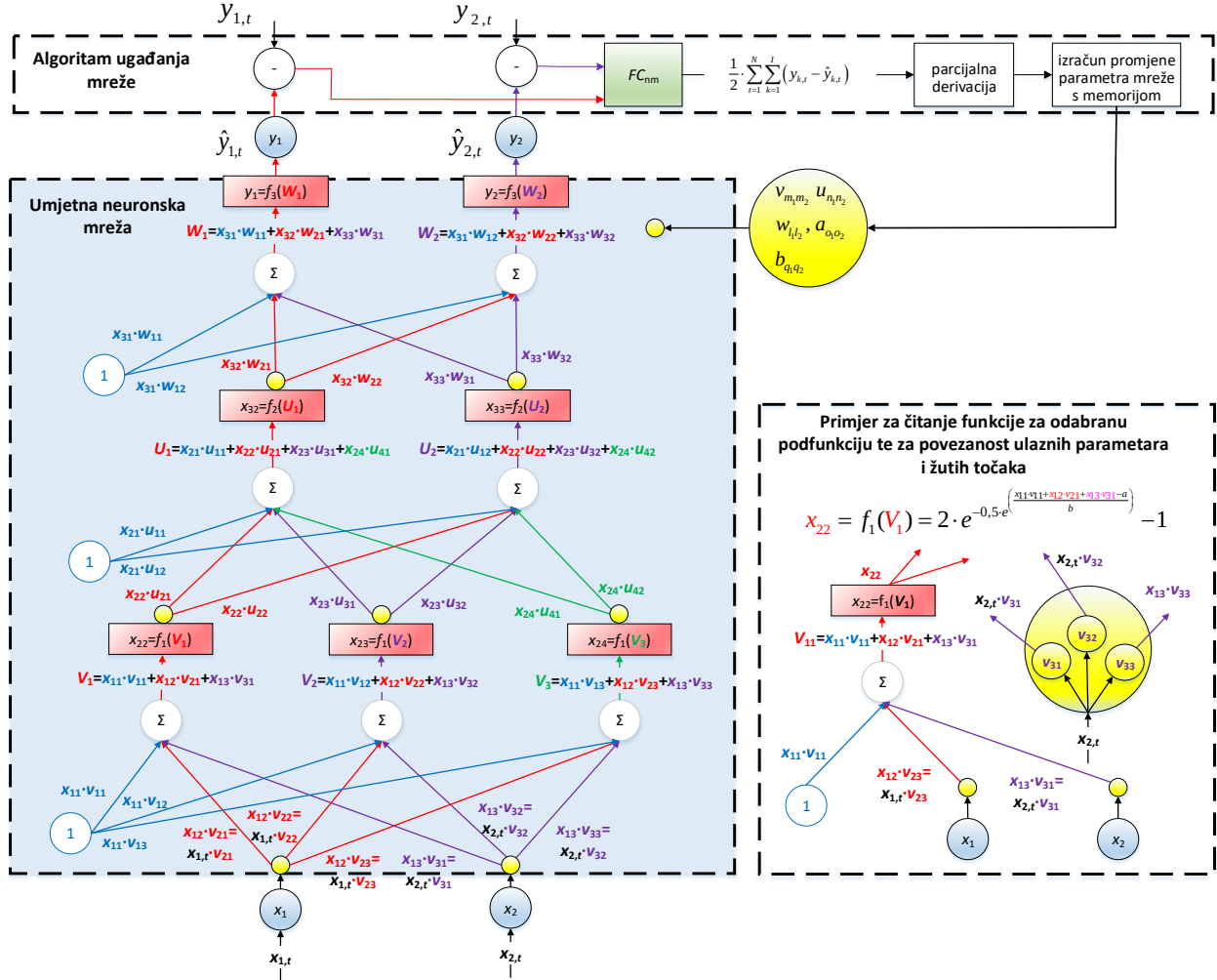
U okviru »Primjer za čitanje funkcije za podfunkciju  $m_1=1, m_2=2$ « prikazana je simbolička definicija za čitanje funkcije umjetne neuronske mreže na primjeru dobivanja ulaza i izračuna izlaza podfunkcije. Tu je  $x_{11}$  varijabla koja je uvijek jednaka broju jedan (općenito može biti neki drugi broj). Ostale međuvrijednosti  $x_{z_1 z_2}$  se izračunavaju od ulaza prema izlazima, osim kod ulaza u mrežu ( $x_{12}, x_{13}$ ) gdje su jednaki ulazima u mrežu ( $x_{12}=x_{1,t}, x_{13}=x_{2,t}$ ).

Tu je razlika u odnosu na regresijski model u tome što regresijski model može imati samo jednu izlaznu vrijednost. Nije to jedina razlika, jer razlika je i u tome što, za razliku od regresijskog modela, umjetna neuronska mreža nije predviđena za korištenje izvan domene minimalnih i maksimalnih vrijednosti podataka s kojima su određeni parametri. Model regresijske analize se, ovisno o rezultatima provjere modela i teoretskim zasadama, može koristiti za podatke unutar domene (interpolacija), a i za izračun vrijednosti izvan domene podataka (ekstrapolacija). Model neuronske mreže ne može ekstrapolirati.

Svojstva podfunkcije ne mogu biti bilo kakva. Ona nakon što se ubaci u strukturu umjetne neuronske mreže a potom neuronska mreža u funkciju cilja ( $FC_{nm}$ ), treba dati takvu funkciju cilja, koja omogućava laku informatičku izvedbu parcijalnih derivacija funkcije cilja po svakom od

<sup>2</sup> Long Ouyang, Jeff Wu, Xu Jiang, Diogo Almeida, Carroll L. Wainwright, Pamela Mishkin, Chong Zhang, Sandhini Agarwal, Katarina Slama, Alex Ray, John Schulman, Jacob Hilton, Fraser Kelton, Luke Miller, Maddie Simens, Amanda Askell, Peter Welinder, Paul Christiano, Jan Leike, Ryan Lowe (2022.), *Training language models to follow instructions with human feedback*, <https://arxiv.org/pdf/2203.02155.pdf>, pristup 4. 6. 2023.

parametara. Potreban je i brz izračun te derivacije. Naime, za razliku od izračuna parametara prikazanog ranije, za opći regresijski model koji je gotovo trenutno (2,5 s), trajanje izračuna parametara za umjetnu neuronsku mrežu može trajati satima (danima, mjesecima, godinama itd.) i nema jamstva za pronalazak zadovoljavajućeg rješenja.



Slika 5. Primjer umjetne neuronske mreže s tri sloja podfunkcija (prvi s tri podfunkcije, drugi i treći s dvije podfunkcije), dva ulaza u mrežu i dva izlaza iz mreže s dijelom za ugađanje parametara

Ovdje se iz [2] odabire funkcija cilja umjetne neuronske mreže  $FC_{nm}$  (18) u kojoj  $I$  predstavlja broj izlaza iz neuronske mreže. Ona je jednaka zbroju svih kvadrata pogrešaka  $\bar{e}_{k,t}^2$ , gdje se pogreška definira kao razlika izlaza dobivenog Gaussovom metodom i izlaza izračunatog umjetnom neuronskom mrežom, slično kao i za regresijsku funkciju cilja  $FC_{ra}$ .

$$FC_{nm} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^I \bar{e}_{k,t}^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^I (y_{k,t} - \hat{y}_{k,t})^2 \quad (18)$$

Umjetna neuronska mreža je informatički fiksirana na tri sloja podfunkcija (jedan od slojeva je zbog dva izlaza) od kojih svaka podfunkcija ima svoju funkciju. Moguć je proizvoljan odabir podfunkcija pojedinih »neurona«, u svakom se sloju odabire drugačija podfunkcija. Podfunkcije po slojevima su u (19).

$$f_1(X) = 2 \cdot e^{-0,5 \cdot e^{\left(\frac{X - a_{o_1 o_2}}{b_{q_1 q_2}}\right)^2}} - 1, f_2(X) = \text{th}(a_{o_1 o_2} \cdot X + b_{q_1 q_2}), f_3(X) = \sin(a_{o_1 o_2} \cdot X + b_{q_1 q_2}) \quad (19)$$

gdje su:

$X$  ulazna vrijednost u podfunkciju i

$a_{o_1 o_2}, b_{q_1 q_2}$  dva parametra podfunkcije (općenito se razlikuju od podfunkcije do podfunkcije).

Ugađanje umjetne neuronske mreže. Koristi se školska ideja u algoritmu za izračun parametara uz koje će funkcija cilja  $FC_{nm}$  težiti k odgovarajućoj vrijednosti. Drugim riječima: s kojima će umjetna neuronska mreža bez poznavanja vrijednosti izlaza, iste moći izračunati dovoljno dobro uz poznate ulaze i parametre određene iterativnim postupkom. Ta školska metoda zove se unatrag prolaz (»povratno rasprostiranje pogreške«, engl. *back propagation algorithm*). Metoda podrazumijeva iterativni postupak dobivanja tih parametara. Ranije opisana *Gaussova iterativna metoda* također je iterativna. Iterativne metode su nasuprot ranije opisanog načina kod regresijske analize gdje se svi parametri izračunaju istodobno u jednom koraku. Izračun parametara umjetne neuronske mreže u jednom koraku je gotovo nemoguć (može se dogoditi slučajno u prvoj iteraciji).

Potrebno je podatke iz domene i kodomene svesti na jednake minimalne i maksimalne raspone (normalizirati, npr. tako da imaju vrijednosti od -1 do 1). Normalizacija smanjuje numeričke probleme i povećava osjetljivost na ulazne varijable manjih vrijednosti (npr.  $x_{1,t} \in [0, 1.000]$  i  $x_{2,t} \in [0, 500]$ , normaliziraju se dijeljenjem svih točaka prvog ulaza s 1.000 i drugog s 500, pa se dobije:  $x_{1,t} \in [0, 1]$  i  $x_{2,t} \in [0, 1]$  čime  $x_{1,t}$  i  $x_{2,t}$  dođu na isti raspon). Ideja je nakon toga postaviti sve parametre na neki način na početnu vrijednost (npr. od -1 do 1, u informatičkoj izvedbi je korištena funkcija »rand« u Matlabu koja daje razdiobu po kojoj je svaki broj rasponu od 0 do 1 jednako vjerojatan, za  $v_{m_1 m_2}$   $u_{n_1 n_2}$ , i  $w_{l_1 l_2}$  od -1 do 1, za parametre podfunkcija  $a_{o_1 o_2}$ ,  $b_{q_1 q_2}$  od 0 do 1).

U toj ideji se nakon toga u trenutnoj iteraciji odabire jedan parametar funkcije mreže (npr.  $w_{l_1 l_2}$ ). Vrijednosti ostalih parametara se ubace u funkciju. Onda se određuje koliko parametar treba promijeniti kako bi se postiglo najveće smanjenje funkcije cilja  $FC_{nm}$  (smanjenje pogreške modela).



Parcijalna derivacija (npr.  $\delta f \{g[h(x)]\} / \delta x = \delta f / \delta g \cdot \delta g / \delta h \cdot \delta h / \delta x$ ) funkcije cilja daje nagib tangente u dvodimenzionalnom prostoru (vrijednost funkcije cilja, vrijednost parametra po kojem se derivira), slika 7. - nagib zelenih crta. Predznak tangente određuje raste li ili pada vrijednost funkcije cilja  $FC_{nm}$  u najbližem okolišu dotične točke prema smjeru promjene odabranog parametra (npr. u točkama I., II. i IV. na slici 7. funkcija pada s povećanjem parametra  $w_{11}$ ). Ako je parcijalna derivacija  $FC_{nm}$ -a u toj točki veća od nule znači da bi s povećanjem parametra  $FC_{nm}$  rasla (npr. točka V. slika 7.), što je nepoželjno pa treba parametar mijenjati u suprotnom smjeru (smanjivati). Zbog toga je negativni predznak kod drugog člana u (23). Parcijalna derivacija za treći sloj parametara ima najkraći matematički izraz. Izraz za derivaciju funkcije  $FC_{nm}$  po parametru  $w_{l_1 l_2}$  ( $\delta FC_{nm} / \delta w_{l_1 l_2}$ ) definiran je jednadžbama (20-22).  $K_2$  je tu općenito broj podfunkcija u drugom sloju na slici 5. ( $K_2=3$ ). Opći izraz za parcijalnu derivaciju parametra u svakom sljedećem sloju -  $\delta FC_{nm} / \delta u_{n_1 n_2}$  (23-24),  $\delta FC_{nm} / \delta v_{l_1 l_2}$  (25) - je sve duži. Slično se mogu napraviti derivacije za parametre unutar funkcija ( $a_{o_1 o_2}$ ,  $b_{q_1 q_2}$ ). Derivacije nisu kreativna djelatnost za razliku od rješavanje neodređenih integrala (od kojih neki nisu nikada ni riješeni).

$$\frac{\partial FC_{nm}}{\partial w_{l_1 l_2}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \sum_{t=1}^N \left( \frac{\partial [y_{l_2, t} - f_3(w_{l_2})]}{\partial f_3(w_{l_2})} \cdot \frac{\partial f_3(w_{l_2})}{\partial w_{l_2}} \cdot \frac{\partial w_{l_2}}{\partial w_{l_1 l_2}} + 0 \right) \Bigg|_t, \quad l_1 = 1, 2, \dots, K_2; \quad l_2 = 1, 2, \dots, I \quad (20)$$

$$\frac{\partial [y_{l_2, t} - f_3(w_{l_2})]}{\partial f_3(w_{l_2})} = -1, \quad \frac{\partial f_3(w_{l_2})}{\partial w_{l_2}} = \cos(a_{o_1 o_2} \cdot w_{l_2} + b_{q_1 q_2}) \cdot a_{o_1 o_2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial w_{l_2}}{\partial w_{l_1 l_2}} = x_{3l_1}, \quad w_{l_2} = x_{31} \cdot w_{1l_2} + x_{32} \cdot w_{2l_2} + x_{33} \cdot w_{3l_2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial FC_{nm}}{\partial u_{n_1 n_2}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^I \left\{ \frac{\partial [y_{n_2, t} - f_3(w_k)]}{\partial f_3(w_k)} \cdot \frac{\partial f_3(w_k)}{\partial w_k} \cdot \frac{\partial w_k}{\partial f_2(u_{n_2})} \cdot \left( \frac{\partial f_2(u_{n_2})}{\partial u_{n_2}} \cdot \frac{\partial u_{n_2}}{\partial u_{n_1 n_2}} + 0 \right) \right\} \Bigg|_t \quad (23)$$

$$\frac{\partial w_k}{\partial f_2(u_{n_2})} = w_{n_2 k}, \quad \frac{\partial f_2(u_{n_2})}{\partial u_{n_2}} = \frac{1}{\text{ch}^2(a_{o_1 o_2} \cdot u_{n_2} + b_{q_1 q_2})} \cdot a_{o_1 o_2}, \quad \frac{\partial u_{n_2}}{\partial u_{n_1 n_2}} = f_1(v_{n_1}) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial FC_{nm}}{\partial v_{m_1 m_2}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^I \left\{ \frac{\partial [y_{m_2, t} - f_3(w_k)]}{\partial f_3(w_k)} \cdot \frac{\partial f_3(w_k)}{\partial w_k} \cdot \left[ \frac{\partial w_k}{\partial f_2(u_1)} \cdot \frac{\partial f_2(u_1)}{\partial u_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial f_1(v_{m_2})} \cdot \frac{\partial f_1(v_{m_2})}{\partial v_{m_2}} \cdot \frac{\partial v_{m_2}}{\partial v_{m_1 m_2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial w_k}{\partial f_2(u_2)} \cdot \frac{\partial f_2(u_2)}{\partial u_2} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial f_2(v_{m_2})} \cdot \frac{\partial f_2(v_{m_2})}{\partial v_{m_2}} \cdot \frac{\partial v_{m_2}}{\partial v_{m_1 m_2}} \right] \right\} \Bigg|_t \quad (25) \end{aligned}$$

Dovoljno mala promjena parametra u smjeru pada vrijednosti funkcije  $FC_{nm}$  dovest će do njezinog smanjenja (npr. iz točke I. u točku II., slika 7.). Potrebno je definirati algoritam koji će izračunati taj pomak  $\Delta w_{l_1 l_2}|_k$  u trenutnoj iteraciji  $k$ . U literaturi [2] se za to predlaže (kao jedan od

načina) druga dva člana ( $-\delta FC_{nm}/\delta w_{l_1 l_2}|_k$  i  $\mu \cdot \Delta w_{l_1 l_2}|_{k-1}$ ) matematičkog izraza za  $w_{l_1 l_2}|_k$  (26). Isti način odabran je za ostale parametre.

$$w_{l_1 l_2}|_k = w_{l_1 l_2}|_{k-1} - \eta \cdot \frac{\partial FC_{nm}}{\partial w_{l_1 l_2}}|_k + \mu \cdot \Delta w_{l_1 l_2}|_{k-1}, l_1 = 1, 2, \dots, K_2, l_2 = 1, 2, \dots, I \quad (26)$$

Drugim članom jednadžbe ( $-\delta FC_{nm}/\delta w_{l_1 l_2}|_k$ ) se korištenjem parcijalne derivacije izračunate u iteraciji  $k$ , u poželjnom smjeru, mijenja vrijednost parametra  $w_{l_1 l_2}$  iz prethodne iteracije  $k-1$  ( $w_{l_1 l_2}|_{k-1}$ ). Ako je strmija funkcija  $FC_{nm}$  (veći apsolutni iznos parcijalne derivacije) parametar će se više promijeniti, a ako je manje strma (manji apsolutni iznos parcijalne derivacije) promijenit će se manje. Proizvoljno obrazloženje tog izraza bi bilo: za strmiju funkcija očekuje se »udaljeniji« minimum pa se treba promijeniti parametar za veću vrijednost, a za manje strmu vrijednost je »bliža« minimumu pa parametar treba promijeniti manje (npr. kod paraboličnog oblika točka I. s većim nagibom je udaljenija od minimuma nego točka II. s manjim nagibom - udaljenost do minimuma označena je dvosmjernom crnom strelicom, slika 7.).

Treći član se naziva moment (količina gibanja, zamah) koji ubrzava algoritam (skraćuje broj iteracija). Pritom je vrijednost  $\Delta w_{l_1 l_2}|_{k-1}$  izračunata promjena tog parametra u prethodnoj iteraciji  $k-1$ . Vrijednosti parametara određuje osoba koji modelira algoritam ugađanja parametara (npr. u [2] se za  $\eta$  preporuča raspon od 0,001 do 10, a za  $\mu$  od 0,1 i 0,9). Proizvoljno obrazloženje bi bilo: veliki nagib u okolišu *uskog i vertikalno izduženog* minimuma (npr. kao sa slike 7.: minimum između nasuprotnih točaka IV. i V.) bi bez momenta mogao davati takve promjene parametra uz koje bi parametar naizmjenično išao u suprotne točke bez smanjenja funkcije  $FC_{nm}$  (iz IV. u V. i obratno - promjene parametara su označene crvenim strelicama), dok bi primjena momenta to onemogućila i tako spuštala točke iteracija bliže minimumu (skraćivanjem pomaka bi se vrijednost funkcije u sljedećoj iteraciji smanjivala).

S tom izračunatom promjenom parametra  $\Delta w_{l_1 l_2}|_{k-1}$  u  $k$ -toj iteraciji (zbroj drugog i trećeg člana) se promjeni vrijednost parametra. U sljedećem koraku se odabire drugi parametar. Kada se s tim postupkom promjene svi parametri u toj iteraciji, kreće se s novom iteracijom. Pritom se na kraju iteracije bilježi vrijednost funkcije cilja  $FC_{nm}$  koja, ako zadovoljava, izračunati parametri se smatraju konačnima. Prilikom postupka ugađanja mreže, ako se funkcija  $FC_{nm}$  prestane od iteracije do iteracije smanjivati, može se uvesti algoritam koji će u tom slučaju promijeniti parametre za ugađanje mreže ( $\eta$ ,  $\mu$ ). Ako ni to ne pomaže, onda se može započeti iterativni postupak ispočetka s drugim nasumično odabranim parametrima mreže u prvom koraku.

Matematički opravdaniji način bi bio tako da se pronađu, za točku u kojoj se umjetna neuronska mreža nalazi, parcijalne derivacije po svim parametrima (gradijent funkcije). Gradijent funkcije vektor je koji označava smjer najbrže promjene funkcije u višedimenzionalnom prostoru (koliko parametara toliko dimenzija). U tome slučaju bi interpretacija i vizualizacija bila složenija (već je četvero-dimenzionalni vektor teško zamisliv), nego u slučaju kada se mijenja samo jedan parametar, kada se isto može prikazati u dvodimenzionalnom prostoru (kako je prikazano ranije), slika 7. Za trodimenzionalni prostor, gradijenti su prikazani na slici 6. (funkcija lijevo, gradijenti desno). Vrijednosti uz jedinične vektore gradijenta parcijalne su derivacije pripadnoga smjera (dimenzija deriviranog parametra). U tome pristupu bi se s gradijentom iz točke stanja u kojemu se nalazi funkcija (stanje je određeno parametrima mreže), istovremeno promijenili svi parametri, čime bi se išlo u smjeru najbržeg pada funkcije  $FC_{nm}$  u svim parametarskim dimenzijama. Unatražni prolaz (*backprop*) tako se zove jer je informatički brže da parametre mijenjamo redom od izlaza prema ulazu (ovdje mijenjamo sve parametre u iteraciji, za razliku od edukativnog pristupa gdje smo mijenjali samo jedan). Sličnost sa slučajem kada se mijenja samo jedan parametar (kako je ranije pokazano, slika 7.), je što i ovdje apsolutni iznos parcijalne derivacije daje indicaciju koliko se brzo funkcija mijenja u okolišu točke u kojoj se nalazimo (nagib tangente), ali sada u višedimenzionalnom prostoru funkcije  $FC_{nm}$  (zbog čega je i potrebno razmišljati o vektoru). U točki stanja funkcije, kada imamo gradijent, možemo usporedbom apsolutnih vrijednosti parcijalnih derivacija za sve parametre, vidjeti koji parametar najviše utječe na smanjenje funkcije (veći apsolutni iznos derivacije veći utjecaj na smanjenje funkcije). U trodimenzionalnom prostoru to bi bilo kao na slici 6. lijevo, gdje dvije isprekidane crte prikazuju put do dva minimuma (bijela, crvena). Broj pripadnih jediničnih vektora ( $\hat{v}_{m_1 m_2}$ ,  $\hat{u}_{n_1 n_2}$ ,  $\hat{w}_{l_1 l_2}$ ,  $\bar{a}_{o_1 o_2}$ ,  $\bar{b}_{q_1 q_2}$ ) koji označavaju smjer pojedinog parametra, jednak je broju parametara. Istovremena promjena parametara vrši se za svaki parametar u istom obliku, primjerice za parametre  $v_{m_1 m_2}$  (28).

$$\begin{aligned} \text{grad } FC_{nm} = & \sum_{m_1}^2 \sum_{m_2}^{K_1} \frac{\partial FC_{nm}}{\partial v_{m_1 m_2}} \cdot \hat{v}_{m_1 m_2} + \sum_{n_1}^{K_1} \sum_{n_2}^{K_2} \frac{\partial FC_{nm}}{\partial u_{n_1 n_2}} \cdot \hat{u}_{n_1 n_2} + \sum_{l_1}^{K_2} \sum_{l_2}^I \frac{\partial FC_{nm}}{\partial w_{l_1 l_2}} \cdot \hat{w}_{l_1 l_2} + \\ & + \sum_{o_1}^{K_1} \sum_{o_2}^{K_2} \frac{\partial FC_{nm}}{\partial a_{o_1 o_2}} \cdot \hat{a}_{o_1 o_2} + \sum_{q_1}^{K_1} \sum_{q_2}^{K_2} \frac{\partial FC_{nm}}{\partial b_{q_1 q_2}} \cdot \hat{b}_{q_1 q_2} \end{aligned} \quad (27)$$

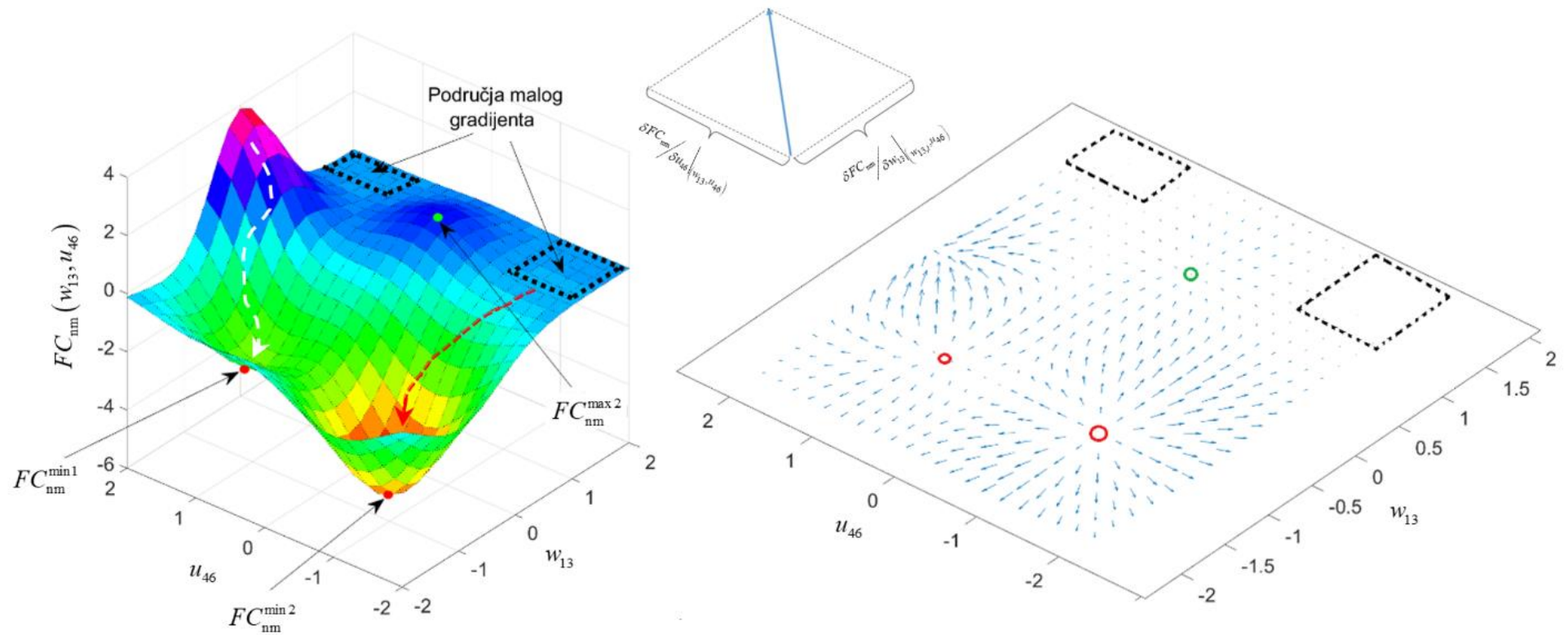
$$v_{m_1 m_2} |_k = v_{m_1 m_2} |_{k-1} - \eta \cdot \frac{\partial FC_{nm}}{\partial v_{m_1 m_2}} |_k + \mu \cdot \Delta v_{m_1 m_2} |_{k-1}, m_1 = 1, 2, m_2 = 1, 2, \dots, K_1 \quad (28)$$

Konkretna mreža ima 37 parametara, pa funkciju  $FC_{nm}$  nije moguće grafički prikazati. Ipak, za ilustraciju izgleda te funkcije u dvije dimenzije (2/37), može poslužiti klasični grafički prikaz

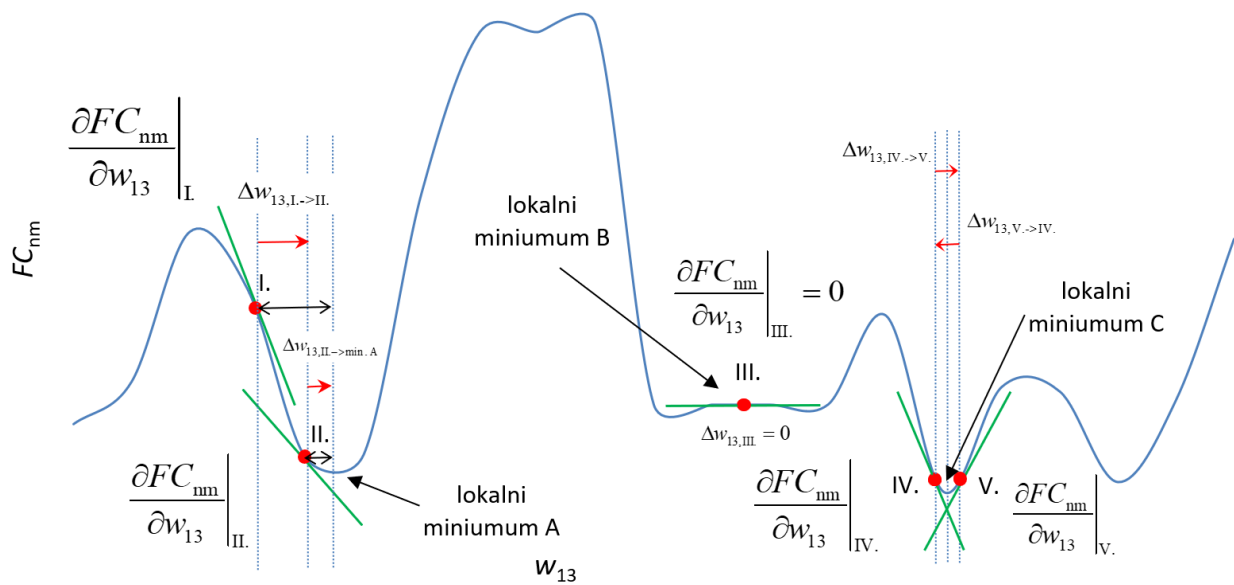
na slici 6. lijevo. Tu je u trodimenzionalnom prikazu oslikana funkcija s dva njezina parametra [ $FC_{nm}=f(u_{46}, w_{13})$ ]. Postoje dva niza strelica koje počinju od različite točke te iteracijama, s promjenama parametara, završavaju u različitim točkama. U prvom slučaju iterativni postupak je imao put najvećim padom funkcije  $FC_{nm}$  u svojem okolišu do najnižeg minimuma na slici (crvena), a u drugom slučaju put je završio u drugom minimumu (bijela). Slično je u točki III. na slici 7. U slučaju kada se iterativni put nađe u lokalnom minimumu, član s derivacijom po bilo kojoj varijabli jednak je nuli i optimizacijski put više ne može doći do globalnog minimuma. Tu se ne može pomaknuti jer je u tom slučaju i promjena parametra u prethodnoj iteraciji jednaka nuli. Na slici 6. desno vidi se iznos gradijenta oko svakog od tri ekstrema. Kako se približavamo ekstremu (zeleni kružić i dva crvena kružića), iznos gradijenta se smanjuje (dužina plavog vektora), kao što se u dvodimenzionalnom prikazu smanjivao nagib tangente. Kod minimuma gradijent nam pokazuje smjer iz provalije (u smjeru povećanja funkcije) a kod maksimuma smjer mu je prema vrhu brijega (smjer povećanja funkcije).

Odabir načina za ugađanje parametara mreže (*»Algoritam parametriranja mreže«*, slika 5.) je kreativna djelatnost. Modelar koji za zadatak ima ugađanje mreže može tijekom rada algoritma intervenirati (npr. smanjiti parametar  $\eta$  deset puta). Kreativnost je potrebna i u programiranju, kojim se prilikom izvedbe istog algoritma, postižu različite brzine izvođenja ovisno o tome kako se isprogramira. To je bitno jer je ugađanje parametara mreže po definiciji sporo i uz najbolju informatičku izvedbu. Recimo, postoji pristup u kojemu se skup ulazno-izlaznih vrijednosti za ugađanje neuronske mreže podijeli na podskupove, i onda se parametri prilagođavaju na temelju okljaštrenih funkcija cilja, koje umjesto cijelog skupa  $\{u(18) \text{ prva suma ide do } N\}$  imaju podskup domensko-kodomenskih parova  $\{u(18) \text{ bi umjesto } N, \text{ bio } N \text{ podijeljen s brojem podskupova}\}$ . Prije stvaranja podskupova obično se nasumično izmiješa redoslijed domensko-kodomenskih parova. Zatim od iteracije do iteracije funkcija cilja ima podskup domensko-kodomenskih parova (npr. ako je broj podskupova tri, prva okljaštrena funkcija cilja ide od  $t = 1$  do  $N/3$ , druga od  $t = N/3+1$  do  $2 \cdot N/3$ , treća od  $t = 2 \cdot N/3+1$  do  $3 \cdot N/3$ , tu je  $N$  djeljiv s tri bez ostatka).

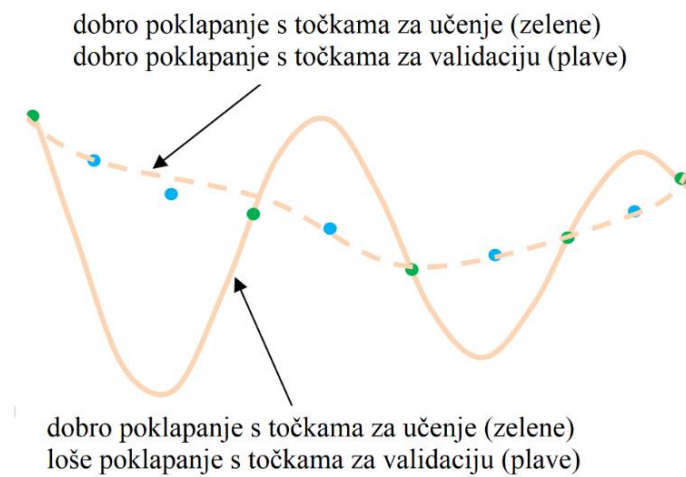
Primjena. Slika 8. prikazuje poklapanje podataka izračunatih umjetnom neuronskom mrežom i onih izračunatih Gaussovom metodom. Tu je vidljivo lošije poklapanje u odnosu na rezultate sa slike 4. (manje poklapanje točaka modela i točnih vrijednosti), koje je na istim podacima polučila regresijska analiza. U nekoliko pokušaja od 2.000 iteracija trajanje jednog izračuna parametara neuronske mreže je do 90 sekundi.



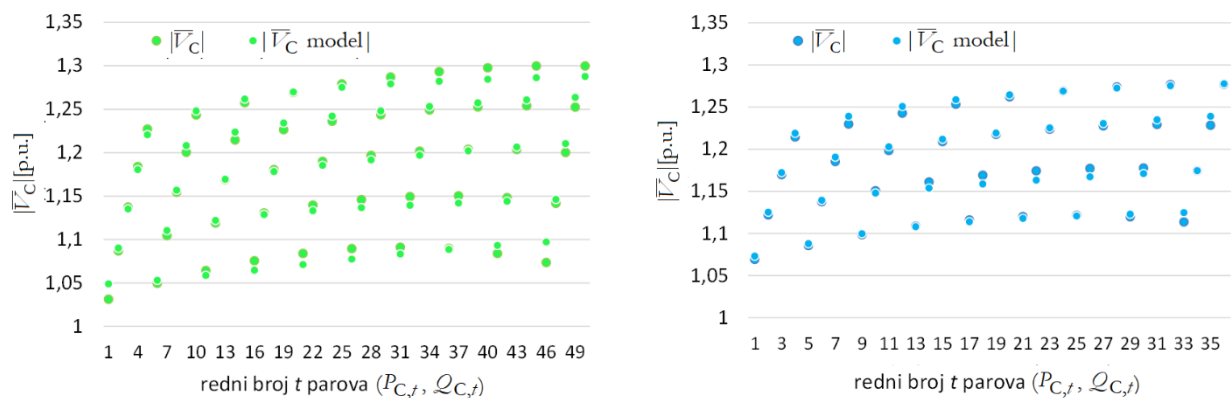
Slika 6. Trodimenzionalne grafički prikaz funkcije cilja  $FC_{nm}(u_{46}, w_{13})$  s vektorima dvodimenzionalnog gradijenta funkcije u domeni  $(u_{46}-w_{13}$  ravnina), s dva optimizacijska puta do minimuma (crveni i bijeli isprekidani optimizacijski put)



Slika 7. Ilustracija modela za promjenu parametara neuronske mreže



Slika 8. Ilustracija rezultata učenja na točkama za testiranje (zelene) i točkama za validaciju (plave) za dvije različito parametrirane mreže



Slika 8. Rezultati primjene neuronske mreže u obliku sa slike 5. {sve podfunkcije imaju funkciju  $f_1$  iz (19),  $K_1=3$ ,  $K_2=2$ ,  $\eta=0.001$ ,  $\mu=0,5$ , podaci su normalizirani logaritamskom normalizacijom od -0,9 do 0,9}

## 5. Zaključak

Regresijska analiza. Alat regresijska analiza se prema iskustvu u ovom radu može definirati na sljedeći način:

- a. savladavanje problema koji se rješava uz stvaranje/korištenje ili jednog ili više ulaza te uvijek jednog izlaza za svaku točku,
- b. odabir modela standardnih svojstava,
- c. izračun parametara modela na temelju parova ulaznih i izlaznog podatka metodom najmanjih kvadrata, i
- d. testiranje modela s izračunatim parametrima.

Model standardnih svojstava je sustav polinoma s proizvoljnim brojem ulaza od kojih svaki može imati proizvoljan stupanj polinoma. Model ima jedan izlaz. Pod metodom najmanjih kvadrata se podrazumijeva traženje minimuma standardne funkcije cilja (zbroy kvadrata razlike između izlazne vrijednosti i izračunate izlazne vrijednosti iz modela). Funkciju cilja s neodređenim parametrima se parcijalno derivira po svim parametrima. Iz sustava parcijalnih derivacija funkcije cilja izjednačenih s nulom se u jednom koraku izračunaju parametri modela. To je školski način traženja lokalnih i globalnih ekstrema (minimuma/maksimuma) funkcija s više varijabli. Nakon izračuna parametara se u regresijskoj analizi testira kvaliteta modela s izračunatim parametrima.

Neuronska mreža. Umijeće korištenja neuronske mreže kao alata, koji je funkcija i pripadni postupak za izračun njezinih parametara, prema iskustvu stečenom radom na problemu, u ovome radu se može definirati kao:

- a. savladavanje originala (problema) koji se rješava uz stvaranje i/ili prikupljanje ulaza i izlaza u točkama (unutar domene primjene), zatim preoblikovanje tih ulaza i izlaza tako da odgovaraju funkciji standardne strukture (umjetna neuronska mreža),
- b. odabiranje broja podfunkcija i samih podfunkcija u standardnoj strukturi funkcije (neuronske mreže) s neodređenim parametrima,

- c. traženje matematičkog opisa zakonitosti između ulaza i izlaza, tako da se iterativnim postupkom ugađaju parametri odabrane funkcije (umjetne neuronske mreže),
- d. krenuvši od nasumično odabranih vrijednosti veza među podfunkcijama ( $v_{m_1 m_2}, u_{n_1 n_2}, w_{l_1 l_2}, a_{o_1 o_2}, b_{q_1 q_2}$ ) te poznatih ulaznih i izlaznih parova podataka (koji pretvaraju u brojeve i zatim normaliziraju) započinje se iterativni postupak,
- e. ako iterativni postupak uz odabrane zadatosti ne postiže dobro rješenje, mijenjanje tih zadatosti metodom »pokušaja i pogreške« {broj podfunkcija u slojevima, podfunkcije, načine normalizacije ulaznih i izlaznih vrijednosti, parametri učenja ( $\eta, \mu$ ) - slično »sintezi i analizi električne mreže« [5]} uz provođenje novih iterativnih postupaka, a u konačnici se
- f. prestaje s iterativnim postupkom i varijacijama kada funkcija (umjetna neuronska mreža) uz ulaze i parametre daje izračunate izlaze podudarne s točnim izlaznim vrijednostima i ako zadovoljava kriterij interpolativnog poopćenja/validacije (slika 8.).

»Neuronska« struktura sadrži tri sloja podfunkcija (»neurona«). Ispred svakog sloja podfunkcija se nalazi zbrajalo čiji rezultat je input u podfunkciju. Ulazi u mrežu idu u svako zbrajalo prvog sloja podfunkcija, prije čega su pomnoženi s jedinstvenim parametrom za svaki ulaz i svako zbrajalo. Na isti način izlazne vrijednosti prvog sloja ulaze u drugi sloj, i onda izlazi iz drugog sloja u treći sloj podfunkcija. Treći sloj daje izračunate izlaze funkcije koji se uspoređuju s točnima.

Iterativnim postupkom kod neuronske mreže pronalazi se najmanja vrijednost funkcije cilja (zbroy kvadrata razlike točnih i izračunatih izlaza). Najmanja vrijednost funkcije ne znači da će funkcija biti dobra za parove ulaza (unutar domene podataka za koje su računati parametri) i izlaza koji nisu korišteni u izračunu parametara, zbog čega se provjerava sposobnost poopćenja na podacima (unutar domene ulaznih podataka, s kojima se nisu računali parametri, validacija).

Funkcija cilja ima neodređene parametre, ako se u nju ne ubace vrijednosti parametara. Ubace li se u nju svi parametri osim jednog, dobiva se funkcija cilja koja ovisi o jednom parametru. Za edukativne svrhe ovo je zamislivo i može se vizualizirati.

Ideja u primijenjenom iterativnom postupku je izračunati koliko treba promijeniti taj parametar ne bi li se funkcija cilja smanjila. Parcijalna derivacija funkcije cilja po tom parametru



dat će nagib tangente u toj točki funkcije cilja. Iz tog nagiba se može odrediti treba li povećati ili smanjiti parametar (uz pozitivan nagib treba smanjiti parametar). Modelar odlučuje na koji će način iz nagiba tangente odrediti za koliko je potrebno promijeniti parametar. U primijenjenom iterativnom postupku se promjena parametra dobije množenjem nagiba tangente (promijenjenog predznaka) s jednom konstantom čiji iznos odabire modelar. Toj promjeni parametra se dodaje umnožak vrijednosti promjene tog parametra u prošloj iteraciji i jedne konstante čiju vrijednost modelar odabire. Kada se promjeni taj parametar nastavlja se sa sljedećim parametrom (uz korištenje prethodno izmijenjenih parametara). S promjenom svih parametara završena je iteracija. Postupak se provodi dok se ne postigne zadana kvaliteta. Iako je dvodimenzionalni primjer bolji za edukativnu svrhu radi lakše vizualizacije (slika 7.), donekle i trodimenzionalni (slika 6.), učinkovitiji je pristup u isto vrijeme promijeniti sve parametre koristeći parcijalne derivacije funkcije cilja po svim parametrima (gradijent koji ima parcijalne derivacije svih parametara) s unatražnim prolazom koji mijenja parametre od izlaza prema ulazu jer je to informatički optimalno (*backprop*).

Navedeni način po kojemu se odabere mreža i daju joj se ulazno-izlazni parovi vrijednosti bez uplitanja čovjeka (*unsupervised learning*) je ponekad prva faza. Nakon toga se može dodati nova faza koja će poboljšavati već pametriranu mrežu, gdje korisnici ugođene mreže daju povratne informacije (npr. prijedlozi korisnika alata <https://translate.google.com/>), na temelju kojih će mreža poboljšavati ishode, što se radi kod izrade modela *ChatGTP*-a tvrtke *Open AI* [9].

Raznovrsnost dostupnih algoritama za isti problem. Za rješavanje jednadžbi elektroenergetske mreže osim Gaussove iterativne metode postoje i druge metode (npr. Gauss-Seidelova). Za računanje parametara neuronske mreže, osim metode unatražnog prolaza (povratnog rasprostiranja pogreške), postoje idejno različite metode (npr. genetski algoritam, engl. *genetic algorithm*), a i različite inačice kod ideje unatražnog prolaza (npr. ADAM). Neuronske mreže mogu imati drugačiju strukturu, a za neke zadaće se koristi više neuronskih mreža. Primjena neuronskih mreža može biti takva da se parametri u primjeni, na temelju novodostupnih podataka, dodatno ugađaju. Rad predstavlja samo jedan od pristupa koji se povezuju s nazivima navedenih alata.

Umijeće modeliranja s neuronskom mrežom nije toliko u uporabi tog alata (za koji postoje gotovi programi) koliko u poznavanju i baratanju s originalom koji se rješava u praksi. To znači niz: »*original – pitanje – model*«. Bez originala nema pitanja, bez pitanja ne zna se što raditi s modelom, a bez originala i pitanja model je bez svrhe [5].

Ipak, čini se kako je potrebno umijeće u odabiru strukture mreže i načina izračuna parametara. To je stoga jer nije riječ o egzaktnom postupku (različite strukture mreže, brojne metode za određivanje parametara, muke s dobivanjem parametara koji daju prikladnu funkciju) pa važnu ulogu mogu imati iskustvo, intuicija, sklonosti, kao i opće netehničko znanje modelara [5]. Modelar bi u specijalizaciji morao biti između svijeta originala i svijeta modela. U radu se kao model pokazao bolji regresijski model koji omogućava interpretaciju originala po kojoj jalova snaga ima veći utjecaj na promjenu napona u originalu, za razliku od pametriranog modela neuronske mreže koji je crna kutija (*black box*) iako ima poznatu funkciju i poznate parametre te funkcije.

Nazivi. Neprikladno je funkciju korištenu u radu nazvati »umjetnom neuronskom mrežom«, i nije prikladno podfunkcije koje jednoznačno preslikavaju ulaze i izlaze nazivati »neuronima«. Osim što nazivi »neuron« i »neuronska mreža« (ili npr. »učenje«, »umjetna inteligencija«, »sinapsa«) »dobro zvuče«, varljivi su jer se njima stvara suvišna mističnost i daje pretjerana važnost determiniranoj funkciji i njenim primjenama u praksi. Ako je tzv. umjetna neuronska mreža osmišljena s inspiracijom temeljenoj na mozgu to ne znači da ona i mozak funkcioniraju slično.

Izvorište modernoga znanstvenoga svjetonazora po kojemu postoji objektivna stvarnost je kod Renéa Descartesa (r. 1596.), koji je uvjerenje obrazlagao time da Bog ne bi dozvolio demonu da obmanjuje čovječanstvo<sup>3</sup>, zatim su se modeli Isaaca Newtona (r. 1642.) temeljili na idejama koje se nisu temeljile na kvantnoj mehanici a jesu se temeljile na ideji da je gravitacija sila a ne iskrivljenje vremena i prostora što je kasnije uveo Albert Einstein (r. 1879.), dok je James Clerk Maxwell (r. 1831.) bezuspješno svoje čuvene jednadžbe pokušao uklopiti u netnovsku paradigmu iz koje je izrastao, a prije prve potpune paradigme za elektricitet Benjamina Franklina (r. 1706.) vjerovalo se da je elektricitet fluid<sup>4</sup>, i tako u nedogled. Da se starim idejama može ponovno poslužiti, svjedoči povratak znanosti na ideje Ruđera Josipa Boškovića (r. 1711.), jer je recimo Maxwell zaključio: »Najbolje što možemo učini jest da napustimo krutu jezgru i da je nadomjestimo Boškovićevim antonimima«<sup>5</sup>. Navedeni povijesni primjeri svjedoče da ne treba bježati od odbacivanja predodžbi koje su trenutačno u primjeni ni od oživljenja starih ideja, ovisno o tome kakve se koristi mogu postići (npr. u edukativnom sustavu, izbjegavanje mistifikacije

---

<sup>3</sup> Diana Rudnički (2017.). *Sav život je san -skeptizam u književnosti -*, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet, Odsjek za filozofiju, završni rad, str. 11.-12.

<sup>4</sup> Thomas Samuel Kuhn (1970., 2002.). *Struktura znanstvenih revolucija*, drugo izdanje, Zagreb.

<sup>5</sup> Stipe Kutleša (2011.). *Ruđer Josip Bošković*. Tehnički muzej Zagreb, str. 136.

umjetne inteligencije). Kod poučavanja učenika elektrotehnici ne krene se s početnim poimanjem u kojem je elektricitet fluid.

Za razliku od mreže neurona u mozgu, tzv. umjetna neuronska mreža se ne može koristiti za ulaze koji su izvan domene ulaza s kojima su izračunati njezini parametri. Uz to je umjetna neuronska mreža determinirana svojim parametrima i strukturom za razliku od mreže neurona u mozgu. Naime, mozak radi u neraskidivoj isprepletenosti predvidivih i nepredvidivih procesa u sustavu neurona (ne-determinizam) pa se ne će moći deterministički spoznati njegov rad [6]. Vjerovanje u determinističku narav prirodnih zakona pokazalo se pogrešnim konceptom XIX. stoljeća (mehanicistički/deterministički koncept) [6], što je rezultiralo pogrešnim ideologijama koje su se na njemu temeljile, budući da nemaju svi prirodni zakoni deterministička svojstva. Navedeni nazivi su na tragu mehanicističkog svjetonazora. Bolje se nije prošlo u XX. stoljeću s biologizacijom društvenih područja (npr. uvjerenje da Darwinov zakon selekcije opravdava neprestanu borbu omogućujući preživljavanje najsposobnijeg, uvjerenje da darvinizam podržava klasnu borbu)<sup>6</sup>. Da demitologizirani pristup, u kojemu bi se alat takozvan umjetne neuronske mreže prikazivao kao običan matematički problem, pokazuje popularnost takvog pristupa kod Granta Sandersona<sup>7</sup>, koji je upravo na takav prikazao problem s vrlo pozitivnim odjekom na društvenim mrežama, čemu doprinose bogato opremljene ilustracije [10].

Valjalo bi razlikovati čovjekovu bit (biološko fizičko tijelo kao forma, fizičko tijelo kao iskustvo koje se proživljava, čovjekovo tijelo aktivno uključeno u sociokulturne odnose) od strojnog alata čovjekolikog ponašanja (algoritmi umjetne inteligencije - strujna inteligencija – strojno ponašanje u kontekstu). Potrebno je imati u vidu da ljudska inteligencija i čovjekovo iskustvo nisu potpuno dokučivi tehnologijama umjetne inteligencije, kao što treba razlikovati uzročno-posljedične odnose (*causation*) od dobrog povezivanja varijabli s matematičkim odnosima (*correlation*)<sup>8</sup>. Recimo, ako umjetna neuronska mreža može funkcijski dobro povezati ulazne s izlaznim vrijednostima, to ne znači da je dokučila uzročno-posljedične odnose između ulazno-izlaznih vrijednosti, kao što je to recimo slučaj s prirodnim zakonima u fizici. Dapače, ona može povezati nasumično odabrane ulazno-ulazne vrijednosti, što pokazuje da u tome slučaju samo sposobnost pamćenja (učenje napamet ne obazirući se na razumijevanje).

---

<sup>6</sup> Balabanić Josip (2009.), »Darvinizam u Hrvatskoj između znanosti i ideologije«, Nova Pristupnost 7 (2009) 3, 373-406, str. 382.-3., 403.-4., <https://hrcak.srce.hr/file/74044>, 7. 8. 2018.

<sup>7</sup> Grant Sanderson završio je matematiku i računarstvo na Stanfordu te predaje na MIT-u *Introduction to Computational Thinking*. Više o autoru ovdje, <https://www.3blue1brown.com/about>, pristup 8. 6. 2023.

<sup>8</sup> Edoardo Sinibaldi, Chris Gastmans, Miguel Yáñez, Richard M. Lerner, László Kovács, Carlo Casalone, Renzo Pegoraro & Vincenzo Paglia (2020), »Contributions from the Catholic Church to ethical reflections in the digital era«, *Nature Machine Intelligence* volume 2, pages242–244.

Na kraju. Valjalo bi istražiti koliko analogija između stvarnog funkcioniranja mreže neurona u mozgu i umjetne neuronske mreže olakšava upoznavanje zainteresiranih za način rada umjetnih neuronskih mreža, a do koje razine mitologizira primjenu umjetne neuronske mreže. Isto bi valjalo usporediti s edukativnom metodom koja bi svela problem na matematičko-simbolički problem koji za cilj ima pronaći odgovarajuću strukturu mreže (broj slojeva, broj neurona po sloju), za koju će se odrediti parametri koji osiguravaju poklapanje ulazno-izlaznih vrijednosti matematičke funkcije s konkretnim ulazno-izlaznim vrijednostima problema. Umjesto paralela s neuronskom mrežom u mozgu, mogla bi poslužiti paralela s regresijskom analizom koja je dio edukativnog procesa na tehničkim fakultetima i samim time je učenicima poznatiji analogni primjer. Time bi se povezivao studentima poznati način rada regresijske analize s nepoznatim problemom neuronske mreže (poznato s nepoznatim), umjesto da se teško dokučivi način rada mozga povezuje s nepoznatim problemom neuronske mreže (nepoznato s nepoznatim). Započinjanje objašnjenja s parcijalnim derivacijama za ovu atraktivnu svrhu, gdje je umjetna neuronska mreža samo jedna od matematičkih funkcija, recimo na predavanju iz matematike, moglo bi zainteresirati studente koji se često pitaju o primjeni toga što uče u njihovom kasnijem zaposlenju.

Trenutačno su u brojnim primjenama izvedbe koje daju modeli umjetne inteligencije nepouzdati: promjena značenje u prijevodu s jednog jezika na drugi, pogrešna akcentuacija u čitanju, greške u pretvorbi teksta na slici u tekst za tekstualnu datoteku, automobili na cesti upravljani bez čovjeka nisu odobreni, može se postići da *Chat GTP* u razgovoru tvrdi da dva plus dva nije četiri i sklon je »izmišljanju« (kao i neki članovi čovječanstva) itd. Rezultati ovise o veličini i kvaliteti uzorka za učenje. Neuronska mreža može postići interpolaciju a ne može ekstrapolirati. Za velike jezične modele (*Chat GTP*) bi trebalo da stručnjaci ostave svoje poslove i ocjenjuju odgovore koje daju ti modeli kako bi došlo do njihova poboljšanja.

Očekuju se poboljšanja u kojima će modeli bolje oponašati original u smislu vizualnog (krivotvorine, *deep fake*) i kod determinističkih problema (autonomno upravljanje tehničkim sustavima). Za očekivati je da će modelari što se tiče oponašanja čovjekovih kognitivnih sposobnosti, imajući u vidu da mozak radi u režimu nedeterminističkog kaosa (složaj racionalnog i iracionalnog te nepredvidivog), biti u položaju Augustinovog dječaka koji je sa školjkom pokušavao nasuti ocean (odzivi čovjeka na stvarnost – knjige, društvene mreže) u rupu na morskoj obali (umjetna neuronska mreža), odnosno da će ipak biti više ili manje loša kopija, što ne isključuje da će moći obavljati društvene (netehničke) funkcije kojima će postizati bolje ishode

nego prosječan čovjek (npr. sudjelovanje na društvenim mrežama s ciljem postizanja željenih izbornih rezultata).

## 6. Literatura

- [1] Marija Ožegović, Karlo Ožegović (1997.). *Električne mreže I*, Split.
- [2] Branko Novaković, Dubravko Majetić, Mladen Široki (1998.). *Umjetne neuronske mreže* FSB.
- [3] Igor Kuzle, Tomislav Plavšić, Sejid Tešnjak (1998.), »Primjena neuronskih mreža za sekundarnu regulaciju napona i jalove snage«, *Energija*, dostupno na: [https://www.hro-cigre.hr/downloads/casopis%20energija/Energija\\_1998.pdf](https://www.hro-cigre.hr/downloads/casopis%20energija/Energija_1998.pdf), pristup 26. 9. 2019.
- [4] Marko Lovrić, Ranko Gojić, J. Vasilj (2012.), »Prognoza potrošnje dan unaprijed korištenjem neuronskih mreža«, HRO CIGRE, Opatija.
- [5] Ivan Flegar (2019.), »Uloga matematičkih modela u projektiranju električnih uređaja«, *Povijest i filozofija tehnike 2019.*, dostupno na: <http://www.hro-cigre.hr/CMS/content/1/2329/Flegar%20PIFT%202019-08.pdf>, pristup 27. 9. 2019.
- [6] Vladimir Paar (2011.), »O komplementarnosti znanosti i vjere«, *Zbornik radova Suvremena znanost i vjera*, Mostar, [https://moodle.fpmoz.sum.ba/pluginfile.php/1393/mod\\_folder/content/0/Znanstveni%20skup/Zbornik%20radova\\_Suvremena%20znanost%20i%20vjera.pdf?forcedownload=1](https://moodle.fpmoz.sum.ba/pluginfile.php/1393/mod_folder/content/0/Znanstveni%20skup/Zbornik%20radova_Suvremena%20znanost%20i%20vjera.pdf?forcedownload=1), pristup 9. 10. 2019.
- [7] Ljupko Teklić (2017.). *Određivanje vrste i mjesta kvara u elektroenergetskoj prijenosnoj mreži primjenom umjetnih neuronskih mreža*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, doktorski rad 2017.
- [8] *The Economist* (2023.), »How to worry wisely about artificial intelligence«, <https://www.economist.com/leaders/2023/04/20/how-to-worry-wisely-about-artificial-intelligence>, članak od 20. travnja 2023., pristupljeno 3. 6. 2023.
- [9] Greg Brockman<sup>9</sup> (2023.), *The Inside Story of ChatGPT's Astonishing Potential* | Greg Brockman | TED, [https://www.youtube.com/watch?v=C\\_78DM8fG6E](https://www.youtube.com/watch?v=C_78DM8fG6E), pristup 4. 6. 2023.

---

<sup>9</sup> Greg Brockman (r. 1987.), predsjednik i suosnivač tvrtke Open AI koja je proizvela ChatGPT.

- [10] Grant Sanderson (2017.), *Neural Networks*,  
[https://www.youtube.com/playlist?list=PLZHQObOWTQDNU6R1\\_67000Dx\\_ZCJB-3pi](https://www.youtube.com/playlist?list=PLZHQObOWTQDNU6R1_67000Dx_ZCJB-3pi), pristup 8. 6. 2023.



*Dubravko Rogale*<sup>1</sup>  
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-  
tehnološki fakultet  
dubravko.rogale@ttf.unizg.hr

*Željko Knezić*  
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-  
tehnološki fakultet  
zeljko.knezic@ttf.unizg.hr

*Dominik Žanić*  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Sveučilište u Zagrebu  
dominik.zanic@hotmail.com

*Sanja Acalija*  
Muzej grada Kaštela  
sanjaacalija66@gmail.com

## **LOVRE SAVIN - KONSTRUKTOR POKAZNIH RADIO UREĐAJA S RANIM ELEKTRONKAMA**

**Sažetak:** Opisani su poznati detalji iz života i djela samozatajnog ingenioznog konstruktora Lovre Savina koji je izgradio niz starih pokaznih radio uređaja iz razdoblja prvog razvoja radijske tehnike s početka prošlog, dvadesetog stoljeća, te više uređaja za njihovo napajanje. Gradio je reakcione, audionske i superheterodinske radijske prijemnike s ranim elektronkama te napajачke uređaje u vidu olovnih akumulatora za žarenje elektronki, vibratorskih pretvarača, ručnih generatora te transformatorskih ispravljača s elektronkama kao i cijevna niskofrekvencijska pojačala i druge pomoćne naprave. Njegovi izradci su pomno napravljeni, mehanička izrada je izuzetno precizna, a koristio je materijale i gradbene komponente iz početka dvadesetog stoljeća tako da od materijala za kućišta dominira bakelit, ebonit, željezni i aluminijski limovi, a upravljački gumbi i skale, zračni promjenjivi kondenzatori, zavojnice, variometri, otpornici, blok kondenzatori, priključnice, podnožja za elektronke i elektronke, pa čak i spojne žice potiču iz istog doba. Razmjerno bogata Savinova zbirka darovana je Prvoj hrvatskoj zbirci mjerne i komunikacijske opreme gdje je pohranjena. Tijekom vremena zagubljena je (ili nije napravljena) tehnička dokumentacija o uređajima, pa je marom autora nanovo izrađena nova, na temelju koje su uređaji

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće / instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća / institucije.

pokrenuti. Fascinantno je da su nakon postupka regeneracije elektronki i priključenja na napon svi uređaji ispravni, u potpunoj su radnoj funkciji i predstavljaju, najvjerojatnije u Hrvatskoj jedinu cjelovitu, vrijednu zbirku ispravnih pokaznih radijskih uređaja iz ranog razdoblja razvoja radijske tehnike u nas i svijetu.

**Ključne riječi:** Lovre Savin, reakcioni, audionski i superheterodinski radijski prijemnici s ranim elektronkama, cijevni radijski odašiljači

*Članak posvećujemo Lovri Savinu i njegovoj obitelji te svim drugim hrvatskim samozatajnim i zaboravljenim stvarateljima, inženjerima i tehničarima koji su svojim djelima ostavili trag svog postojanja u hrvatskoj tehničkoj povijesti.*

## Uvod

O ingenioznom samozatajnom konstruktoru i graditelju replika ranih radijskih uređaja Lovri Savinu hrvatska strukovna javnost gotovo ništa ne zna. Samozatajno je živio, radio i stvarao u Kaštel Lukšiću. Iza sebe je ostavio vrijednu zbirku koja je brigom i dobrotom obitelji te posredovanjem Muzeja grada Kaštela donirana i pohranjena u Prvoj hrvatskoj zbirci mjerne i komunikacijske opreme [1, 2]. U Savinovoj tehničkoj ostavštini nalaze se reakcijski, audionski i superheterodinski radijski prijemnici i uređaji za napajanje u vidu olovnihih akumulatora za žarenje elektronki, vibratorskih pretvarača, ručnih generatora te transformatorskih ispravljača s elektronkama kao i cijevna niskofrekvencijska pojačala, zvučnici i druge pomoćne naprave. Koristio je, danas vrlo rijetke, elektronske cijevi uz ranih dvadesetih i tridesetih godina prošlog stoljeća. Tako se u uređajima mogu naći povijesne elektronke Telefunken RE074 (1926. g.), Valvo A408 (1928. g.), Telefunken RES094 (1928. g.), Marconi LP2 (1930. g.), Telefunken AF7 (1934. g.), Philips AL1 (1935. g.) te "najmlađe", njemačke vojne elektronke (Wermacht) RV2P800 i RL2P3 iz 1936. godine.

Mnoge izratke konstruirao je i izradio još tijekom Drugog svjetskog rata s pomoću kojih je tijekom talijanske okupacije Dalmacije ilegalno slušao radiodifuzne programe, a u svojoj mirovini ih je nanovo sagradio. Njegovi izradci su pomno napravljeni, mehanička izrada je izuzetno precizna, a koristio je materijale i gradbene komponente iz početka dvadesetog stoljeća tako da od materijala za kućišta dominira bakelit, ebonit, željezni i aluminijski limovi, a upravljački gumbi i skale, zračni promjenjivi kondenzatori, zavojnice, varimetri, otpornici, blok kondenzatori, priključnice, podnožja za elektronke i elektronke, pa čak i spojne žice potiču iz istog doba.

Unatoč nedostatku tehničke dokumentacije, autori su u prvoj fazi detaljno prostudirali sklopovlje Savinovih konstrukcija i pronikli osobitosti njegovog tehničkog razmišljanja te uspješno odgonetnuli način rada njegovih uređaja, priključke i radne napone. Zanimljivo je da je Savin u većem broju uređaja (ne svim) koristio po dvije iste elektronke, najčešće jednu kao visokofrekvencijsko pojačalo i demodulator, a drugu kao niskofrekvencijsko pojačalo.

U drugoj fazi, nakon kondicioniranja starih elektronskih cijevi, koje godinama nisu bile pod naponom, svi su uređaji ispravno proradili potvrdivši i nakon više godina Savinovu ingenioznost i perfekcionizam tehničke izvedbe. Potom su izmjerene i njihove električke i elektroničke karakteristike tako da se može kazati da se sada Savinova zbirka radijskih



uređaja sastoji od redom ispravnih artefakata koji su ponovo oživljeni s deklariranim tehničkim obilježjima te kao takvi pohranjeni u Prvoj hrvatskoj zbirci mjerne i komunikacijske opreme.

Nakon uvida u očaravajuću Savinovu tehničku ingenioznost i istodobnu samozatajnost, autori se nisu mogli oduprijeti porivu da hrvatskoj tehničkoj javnosti, koja poštuje i njeguje naše tehničke stvaratelje, ne predstave tog dosad nepoznatog čovjeka. Stoga u ovom radu donosimo poznate detalje iz života Lovre Savina prema kazivanju njegova prijatelja Davora Rodina i posebno njegovog nećaka Davora Mande [3, 4] te prema sjećanjima članova šire obitelji kao i tehničke autorske prikaze karakterističnih artefakata.

---

## 1. Crtice iz života Lovre Savina

Lovre Savin (1930. – 2010.), inovator, zanesenjak tehničkim mogućnostima radija, nadareni entuzijast i zaljubljenik u radiofoniju rođen je u Splitu, a život proveo u kaštelanskoj obitelji u kojoj su rođena tri sina (Ivan, Ljubo i Lovre). U vrijeme njegovog rođenja Kaštela su niz odvojenih naselja. Danas je to Grad koji obuhvaća područje uz obalu zaljeva, južno od vrha planine Kozjak do mora, prostor između kulturno-povijesnih centara Splita, Trogira i stare Salone. Grad Kaštela, ravničarski prostor s plodnim Kaštelanskim poljem i dugim obalnim pojasom. Blaga klima, obilje izvora pitke vode, plodna ravnica te položaj naselja uz obalu bili su presudni za svekoliki razvitak i život stanovnika kao i za povijesna zbivanja u ovom kraju. Grad je nastao početkom XV. stoljeća u vrijeme kad se u Dalmaciji uspostavlja trajna vlast Venecije a koja će potrajati od 1420. do 1797. godine. Kaštelansko je polje, pod njenu vlast došlo kao dio splitskog i kao dio trogirskog teritorija. Kako bi, od prodora Osmanlija zaštitili svoje posjede, Splitska nadbiskupija, Benediktinski samostan, te trogirski i splitski plemići, podižu utvrde (kašte) i utvrđena naselja po kojima čitav prostor dobiva naziv Kaštela.

U jednom od kaštelanskih naselja, Kaštel Lukšiću, živjela je i Lovrina obitelj. Lovre je, iako prirodniak i vrlo senzibilan čovjek, još kao sedmogodišnje dijete pokazivao zanimanje za tehniku. Živio je u mjestu u kojem o stvaralačkoj sposobnosti ljudi svjedoče mnogobrojni ostatci materijalne i duhovne kulture koji su se, unatoč nedaćama, zatiranju i otuđivanju u manjim i većim fragmentima sačuvali od prapovijesti do Lovrine mladosti i današnjih dana. Zainteresiranost za tehniku pokazao je vrlo rano. Njegov prvi uradak bili su baterijski članci koje je napravio od bakelitnih posuda koje mu je otac Rajko donio sa svog radnog mjesta u pošti. Još 1934. godine u kući su imali novi radio PHILIPS 836A, sa srednjim i dugim valom koji je Lovre puno kasnije 2000-ih godina i rekonstruirao.

Na tehnička stvaranja potaknuli su ga i događaji koji su u njegovom mjestu nastali nakon kapitulacije Italije 1943. godine. Naime, u kaštelu posjedničke obitelji Vitturi i kući tadašnjeg namjesnika fašističke Italije, oficira konte Renata, među blagom neprocjenjivih kulturno-povijesnih vrijednosti krili su se i mnogobrojni tehnički predmeti što je posebno interesiralo Lovru i njegovog prijatelja Davora Rodina koji su tada još bili osnovnoškolski đaci. Kaštel i kuće su, ostavši bez vlasnika koji su pogubljeni i iseljeni, ostao na milost i nemilost „nezadovoljnom narodu“ a posebno razularenoj djeci. Kaštelanski puk i djeca, a

među njima Lovre upali su u dom konte Renata u kojem se, među umjetninama nalazio i jedan među najstarijim kino projektorima korištenim u Dalmaciji (u Muzeju Grada Splita je sačuvan jedan firme PATHE FRERES koji je prije Prvog svjetskog rata korišten u Karamanovom kinematografu i koji se s ponosom nazivao „električni bioskop“). Lovre i Davor su iskoristili nastalu situaciju, iz tog projektora izvadili su elektronke sa željom da se po ostatak projektora vrate sutradan. Međutim, sutradan su ga našli u moru gdje ga je puk iz bijesa bacio. Zanimljivo je kako si Lovre nikada nije oprostio to uništavanje povijesne baštine (kako je on pod stare dane znao reći). Međutim, elektronke koje su uzeli iz kino projektora su im poslužile da naprave svoje prve reakcione baterijske prijemnike na srednjem valu (SV), kojima se Lovre nastavio baviti cijeli život. Sheme za iste dobili su od Ive Remetina koji je bio prvi inženjer slabe struje u Kaštelima.

Među predmetima koje su donijeli iz već poharanog kaštela Vitturi našli su se Leclancheovi galvanski članci i ostali predmeti koji su korišteni u vrijeme prije pojave električne mreže. Već „zaražen“ radiom i njegovom primjenom, mnoštvo radio cijevi pribavila mu je iz svog doma njegova tadašnja prijateljica Filka Stude iz Kaštel Novoga.

Još 1944. godine vrijeme je provodio u radionici za održavanje sredstava veza pri Osmom korpusu Narodno Oslobodilačke Vojske.

Nakon završene osnovne škole, 1945. godine, upisao je Srednju tehničku školu u Splitu. Ta godina je također bila značajna jer je označila kraj Drugog Svjetskog rata, kada je u Kaštela došla XIX. Partizanska divizija koja je na 1. katu kuće obitelji Rodin u Kaštel Lukšiću formirala radio servis. Taj radio servis je bio izvor elektronki i akumulatora za Lovru i Davora koji su do njih dolazili zbog nemara vlasnika. U to vrijeme su se pojavili prvi superheterodinski prijemnici koje su Lovre i Davor popravljali za novac. Prvu praksu je obavljao u TV servisu Briksi u Splitu gdje je kasnije neko vrijeme i radio. U slobodno vrijeme radio je i na održavanju raznih civilnih i vojnih elektroničkih uređaja na brodovima Jugoslavenske Ratne Mornarice.

Godine 1950. završava srednju školu, u Kaštelima servisira radio prijemnike i zapošljava se kao kino operater u kinu „Plavi Jadran“ u Kaštel Starome. Kod kuće izgrađuje i oprema elektronički laboratorij i TV servis s najsuvremenijim instrumentima i mjernim uređajima (osciloskop, elektronke,..) koje je nabavljao direktno u tvornici Philips.

Sredinom 50-ih godina XX. stoljeća, Davor njegov prijatelj iz djetinjstva, nakon završenog fakulteta zapošljava se kao inženjer u kaštelanskom Jugovinilu. Lovre tada dolazi u kontakt sa strojevima za varenje plastike, polietilenskih i polipropilenskih folija pomoću visokofrekventnih struja. Bio je to, engleski stroj manjih dimenzija, snage 400 W koji je radio na frekvenciji od 27 MHz. Lovre je prvi na ovim prostorima započeo raditi usavršene konstrukcije takvih uređaja koje je prodavao raznim industrijama u bivšoj Jugoslaviji pri čemu je sam izrađivao i visokofrekvencijske generatore za njih, sl. 1.

Strojevi su bili namijenjeni za npr. serijsko pakiranje šampona za kosu u tzv. jastučićima. To je radio za tvornicu kemijsko - kozmetičkog proizvoda – Cosmochemia osnovane 1954. godine u Otočcu. Nekoliko strojeva za izradu

plastičnih omota za bilježnice i knjige napravio je za tvornicu plastike u Pločama (poduzeće Kartonplast Ploče) gdje je radio kao vanjski suradnik i popravljao spomenute. U Kartonplastu su mu ponudili i radno mjesto što je on prihvatio. Radio je od kuće, a u Ploče je odlazio po pozivu kako bi održavao elektronike na strojevima. Na korištenje je dobio, u to vrijeme moderni automobil Renault 16. Taj posao obavljao je do sredine 70-tih godina. Na temelju poznavanja tih uređaja neko je vrijeme u tom poduzeću radio i kao tehnički direktor.



Sl. 1.: Lovre Savin i njegova konstrukcija stroja za visokofrekvencijsko varenje plastike

Krajem 50-ih godina XX. stoljeća kaštelani nabavljaju prve televizijske prijemnike koji su u to vrijeme hvatali samo signal iz Italije. Lovre čitavo vrijeme nabavlja i prati svu stručnu literaturu s područja elektronike, kao i priručnik za popravljjanje TV uređaja (Tadej, Miroslav: Televizor, Tiskarski zavod »Ognjen Prica«, Zagreb, 1958.) koji je tada imao servis u Masarykovoj ulici u Zagrebu. Pomno proučava i servisira televizijske prijemnike kao jedini serviser u Kaštelima, što mu je postao glavni izvor financija. Ovaj posao je radio sve do mirovine kada su se pojavili prijemnici sa poluvodičkom tehnologijom.

1980- tih godina bio je član avio kluba u Sinju gdje je pohađao tečajeve za

letenje i maštao o nabavci malog aviona.

Odlaskom u mirovinu počeo se baviti reprodukcijom radio prijemnika iz svoje mladosti. U to vrijeme je napravio radio predajnik i počeo se baviti radioamaterstvom. Zanimljivo je da je tek tada počeo učiti Morseovu abecedu i komunicirati s njome. Kolekciju radio uređaja koje je napravio u mirovini je zamislio kao povijesni pregled ranih dana radio tehnike u Hrvatskoj, onako kako ju je on doživio. Zamisao mu je bila napraviti mali muzej na prvom katu svoje kuće gdje bi svim zainteresiranima prezentirao povijest radiotehnike, međutim, zbog spleta okolnosti, godina i manjka interesa okoline nikada nije uspio realizirati taj san. Preminuo je 18. rujna 2010. godine i pokopan na mjesnom groblju u Kaštel Lukšiću. Nadamo se da smo, ovom objavom, ostvarili bar dio njegove vizije. U narednom tekstu kurzivom su prenesene njegove originalne zabilješke tako da će čitatelj u njima naći još dodatnih i zanimljivih detalja iz Savinova života.

## **2. Donacija mjernih uređaja i Savinovih konstrukcija ranih radijskih uređaja**

Donacija Lovre Savina koja je pohranjena 14. studenog 2020. godine u Prvoj hrvatskoj zbirci mjerne i komunikacijske opreme sadrži 26 artefakata. Od toga je devet mjernih uređaja iz Savinova laboratorija: Philips PM 6302 RLC bridge, Philips PM 5334 TV sweep generator, Philips PM 5335 Fixed marker generator, Philips PM 5324 HF generator 100 kHz – 110 MHz, Philips PM 5509 PAL TV pattern generator, Tube tester I-177 B-GY, Tube tester RPG 2/38, Tube tester SAFAR PROVAVALVOLE TIPO P.V.11, Signal generator ZD 00783 OSCILLATOR TEST CT 212 i dva tvornička koncertna radio aparata: prijemnik Savica 56 bez kutije i prijemnik Philips 836A bez kutije s elektronskim cijevima Valvo RENS1264, Philips Miniwatt AF2, Telefunken REN904.

Nadalje, donacija artefakata Lovre Savina sadrži 15 njegovih originalnih konstrukcija:

- Radio RLS KV-SV-DV Philips Miniwatt AF3 i AK2 s Octal priključkom za napajanje
- Ispravljač s elektronkom AZ1 i s zvučnikom s Octal ženskim priključkom
- Radio s utičnim zavojnicama srednji i kratki val s cijevima Tungsram ABC1, AF3, AL4
- Radio s cijevima Telefunken RV2P800 i skalom za srednji val
- Ispravljač 250 V DC i 4V AC za žarenja, s elektronkom AZ1
- Prijemnik Audion s dvije elektronke Telefunken RE074 i izmjenjivim variometrom za valna područja
- Prijemnik s cijevi Valvo A408 i ulaznim variometrom
- Prijemnik s cijevi Telefunken RES 094 i ulaznim variometrom
- Prijemnik s dvije cijevi Marconi LP2 i izmjenjivim ulaznim titrajnim krugom
- Prijemnik s njemačkim (Wermacht) elektronkama RL 2P 3 i RV 2 P 800
- Prijemnik Audion s 2 dvije cijevi Telefunken RE074 i izmjenjivim variometrom za valna područja

- Prijemnik s cijevi Valvo A408 i ulaznim variometrom
- Prijemnik s cijevi Telefunken RES 094 i ulaznim variometrom
- Prijemnik s 2 cijevi Marconi LP2 i izmjenjivim ulaznim titrajnim krugom i
- Nezavršen odašiljač s elektronkama SG3S (stabilizator napona), 6AG7 (oscilator), 6V6 (driver) i 2x807 (izlazni stupanj)

Neke od zanimljivih Savinovih konstrukcija opisane su u ovom članku: tri jednocijevna, tri dvocijevna i jedan četverocijevni prijemnik. Gradnjom radio uređaja započeo je 1942. godine, a odlaskom u mirovinu gradi niz novih uređaja, replika svojih mladenačkih ostvarenja. Uz svaki uređaj ćemo kurzivom navesti i njegove originalne zapise pronađene u inače oskudnoj naslijeđenoj dokumentaciji. Tako, kao uvod u svoja načela izrade starih uređaja, Savin piše: *„Izrada jednog uređaja, bilo prijemnika ili uređaja za napajanje je složen posao. Prvo moramo izraditi idejni projekt koji se mora uklopiti u zadano vrijeme. Moramo raspolagati sa sastavnim dijelovima iz tog doba. To podrazumijeva imati sve od zavrtnja do elektronki. Tehnička dokumentacija i njezina prilagodba. arhitektura koja mora biti lijepa i vremenski podudarna. Sve u svemu moj laboratorij je tako projektiran da mogu radove izvoditi na svih osam radnih površina. Crtež, eksperimentalni dio i mehanička obrada šasija. Kondenzatori, otpori i ostali sastavni dijelovi podliježu vremenskom odabiru. Same zavojnice često sam morao sam namotati. Sve u svemu mukotrpan posao koji sam ja s mnogo volje uradio“.*

I uistinu, Savinova djela su pravo remek djelo tehničkog stvaralaštva i ingenioznosti. Da ne znamo da su to njegovi izradci, mogli bi pomisliti po načinu izrade, korištenim materijalima i elektroničkim elementima te arhitekturi gradnje, da su to izvorni originali nastali u rano doba razvoja radijske tehnike.

## 2.1. Koncertni prijemnik – Audion

Prema dostupnoj dokumentaciji ovo je prvi Savinov uradak. Prva samogradnja tog uređaja datira iz 1942. godine, a nanovo ga je izgradio 1988. godine koristeći elektronsku cijev triodu A408 pri čemu navodi da je to bila prva serija cijevi proizvedena u tvornici VALVO u Hamburgu 1928. godine. Također navodi da su i svi drugi dijelovi iz tog doba, te piše: *„To su bile godine okupacije ili Drugog svjetskog rata. Mrak je prekrrio moje selo. Jedina veza sa svijetom bio je radio. Kako noću nije bilo električne struje, tako se nije moglo ni u tajnosti slušati savezničke radio stanice. Uz pomoć mog tate i njegovog prijatelja Ive Remetina, uspijevam da sagradim prvi mali baterijski radio prijemnik. To je za nas i naše prijatelje bio velik događaj. Nismo bili ovisni o seoskoj električnoj mreži, ali smo bili ovisni o olovnim akumulatorima i džepnim baterijama. Moram vas podsjetiti da je naš tata, tada radio na održavanju novo sagrađene prve automatske telefonske centrale u Kaštel starom. Ta mala centrala sa svega 60 pretplatnika, bila je upravo po mojoj mjeri! A tek prijatelji mog tate! To su bili većinom letačko osoblje, radio telegrafisti, aviomehaničari i ostali iz tehničke službe u Divuljama, vojne hidro zrakoplovne baze. Zaista vrijedni ljudi. Često su nam poklanjali razne knjige iz područja tehničkih znanosti. Nekoliko knjiga nadživilo je moje roditelje i*

*prijatelje. Ta tema je vrlo sadržajna i zaslužuje da joj posvetim mnoštvo stranica, o ljudima i događajima. Živim u nadi da će te stranice jednom vidjeti svjetlost dana.*“. Nismo sigurni da su se sve te Savinove nade ostvarile, no možda ćemo mi, kao autori ovog članka, uspjeti prenijeti barem dio njegovih stremljenja prikazujući ga kroz njegove zapise, a ponajviše kroz s

Audionski prijemnik, sl. 2., je Savin izgradio s minimumom dijelova: samo dva blok kondenzatora od 300 pF i od 1 nF, zračnog promjenjivog kondenzatora od 500 pF, otpornika od 2 M $\Omega$  za prednapon rešetke triode i reostata od 50  $\Omega$  u krugu žarenja elektronke. Zavojnicu ulaznog titrajnog kruga je sam namotao u spoju variometra. Na prednju stranu uređaja od ebonita montirao je gumb variometra, priključke za slušalice od 4 k $\Omega$  i veliku skalu zračnog promjenjivog kondenzatora s graduacijom od 1 do 100.



Sl. 2.: Prvi koncertni prijemnik – audion Lovre Savina

Trioda A408 ima izravno žarenu katodu, a žarila se istosmjernim naponom od 4 V i strujom od 80 mA. Savin je vješto iskoristio pad napona žarenja na katodi spojem kojim istodobno osigurava prednapon rešetke triode od -4 V, prema shemi koju su snimili autori, sl. 3.

Shema je slična shemi iz prospekta A408 Valvo-Röhren Prospekt 1933. tt. Telefunken, a za koju je vjerojatno znao i Savin kao izvrstan poznavatelj literature iz oblasti radiotehnike. Variometar je namotao lak žicom na bakelitnom cilindru promjera 80 mm s vrlo vješto mehanički izvedenom dodatnom zakretnom zavojnicom unutar cilindra. Izvedba je tako dobro pogođena da se najbolja reakcija postiže pri kutu zakreta unutarnje zavojnice od 45°.

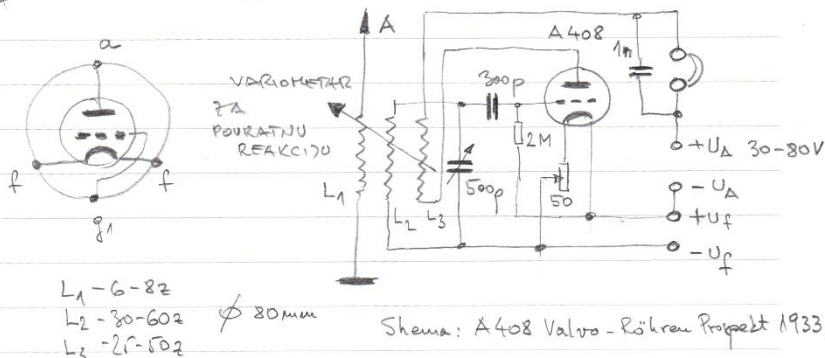
# KONCERTNI PRIJEMNIK - AUDION

SV - 530-1780kHz

VALVO A408 1926g.

Shema: radiomuseum.org  
pod A408

$U_f = 4V$   $I_{0,8A}$   $U_A = 30-80V$



SPRATI NA +4V (TO JE MASA)  
DA SE DOBIJE PRENAPON OD  
-4V NA REŠETKI TRIODE!



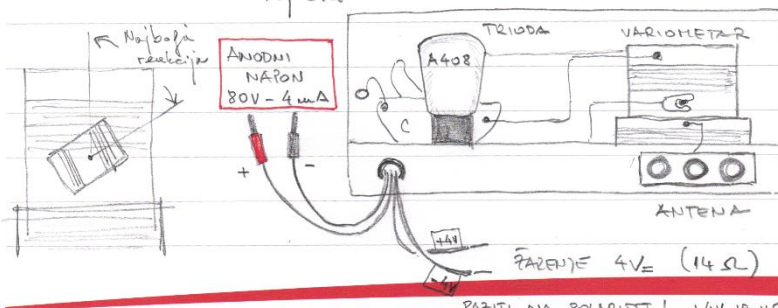
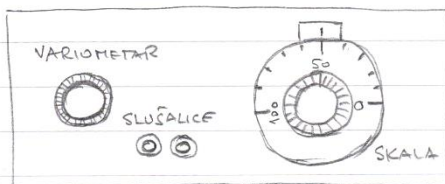
Radijski poslušalnik

530kHz - skala 100

(puni kapacitet)

1MHz - skala na 50, polna kap.

1,78 MHz - skala na 0, minimalni  
kapacitet



PAZITI NA POLARITET! +4V JE USTVARI NA  
MASI DA SE DOBIJE

-4V NA REŠETKI  
TRIODE. RADI SUPER!

Sl. 3.: Skice iz tehničke dokumentacije prvog autora članka načinjena za prvi koncertni prijemnik – audion

Za ispravan rad audion traži dva naponska izvora: 4 V i 80 mA istosmjerno za žarenje te 80 V i 4 mA istosmjerno za anodni napon. Iz ovih podataka je vidljivo da je konstrukcija audiona vrlo štedljiva s motrišta potrošnje kapaciteta baterija, a pri spajanju izvora napajanja na audion treba jako paziti na polaritet priključaka s

obzirom na ispravan rad uređaja. Provedenim mjerenjima uz pomoć signal generatora utvrđeno je da je prijemna frekvencija uz najveći kapacitet promjenjivog zračnog kondenzatora i uz oznaku na skali 100 točno 530 kHz, pri oznaci na skali 50 prijemna frekvencija je 1 MHz, a na pokazivanju skale 0 pri minimalnom kapacitetu je frekvencija prijema 1,78 MHz. I tu je vidljivo konstruktorsko umijeće Savina, njegov audion fantastično dobro pokriva cijeli srednji val radiodifuznih frekvencija samo uz pomoć variometra i zračnog kondenzatora bez ijednog dodatnog induktiviteta ili zračnog kapacitivnog trimera.

Posebnu zanimljivost predstavlja neobična regulacija glasnoće koja se može podesiti regulacijom struje žarenja. Pri slušanju emisije snažnog odašiljača, glasnoća zvuka u slušalicama se može smanjiti smanjenjem struje žarenja reostatom na način da se povećanjem otpora u potrebnoj mjeri smanji emisija katode elektronke

## 2.2. Refleksni jednocijevni prijemnik s kristalnim detektorom

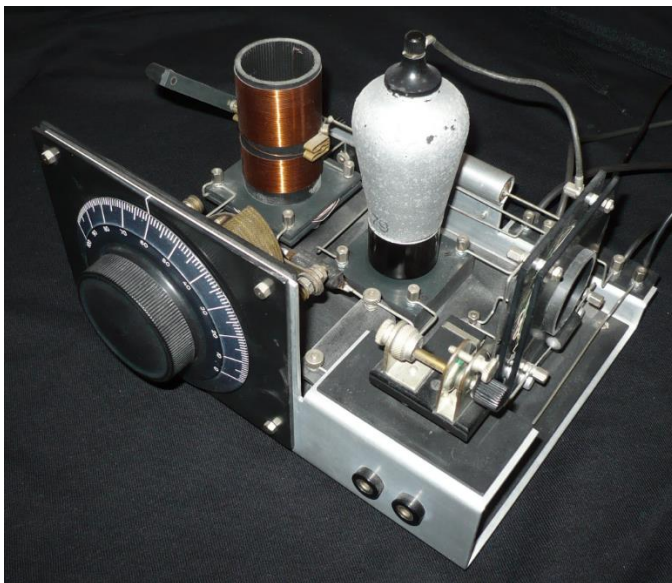
Prvi takav uređaj Savin gradi 1943. godine, a rekonstruira ga 1988. godine koristeći elektronku RES 094 tt. Telefunken iz 1928. godine. O tome piše: „*Kao mali dječak, eksperimentator radio amater, nisam mogao koristiti kristalne detektore jer u blizini nije bilo radio odašiljača. Zahvaljujući prof. Slavoljubu Briksiju koji je u časopisu Nikola Tesla za decembar 1936. objavio nekoliko spojeva baterijskih prijemnika sa kristalnim detektorom, omogućilo mi je upotrebu kristalnog detektora za prijem udaljenih radio stanica, U to doba imao sam na raspolaganju mnoštvo radio cijevi i ostalih radio dijelova. Te prijemnike radio sam s dvorešetkastim radio cijevima. Philips A 141, A 241, A 441 i Telefunken RE 073. Napon zagrijavanja zavisno o tipu kretao se od 1,5 V do 4 V, a anodni napon od 4,5 do 20 V. Na moju veliku žalost mnogo radio cijevi pregorio sam ili potrošio pred više od 60 godina! Sama slučajnost je da sam uspio pronaći djelić moje prošlosti i sagraditi ovaj prijemnik u spomen na dragog profesora Slavoljuba Briksija. Ipak ću vam povjeriti jednu malu tajnu. Prvu knjigu Tri večeri o radiotelegrafiji i radiofoniji napisao je prof. Otac Bernardo Brixu u Zagrebu 1925. Imam pretisak. Otac Bernardo napušta franjevački red i oglašava u časopisu pod imenom Slavoljub Briksi.*“

U spomen Briksiju, Savin gradi prekrasan cijevni prijemnik pod nazivom Prvi refleksni jedno cijevni prijemnik s kristalnim detektorom. I njegova prednja ploča je lijevom dijelom građena od ebonita s velikom skalom zračnog promjenjivog kondenzatora s graduacijom od 0 do 100 i priključkom za visokoomske slušalice od 2 do 4 k $\Omega$ , sl. 4.

Iz načinjene skice iz tehničke dokumentacije prvog autora, vidljiva je shema spajanja i podnožje elektronske cijevi Telefunken RES 094, sl. 5. Savin te cijevi naziva dvorešetkastim cijevima, kako su nekad i bile nazivane jer imaju dvije rešetke, a kasnije, sve do danas se nazivaju tetrodama. Tetroda Telefunken RES 094 ima izravno žarenu katodu istosmjernim naponom od 3,8 do 4 V uz struju žarenja od 63 mA. Tetroda je konstruirana da podnosi anodni napon do 200 V, a napon druge rešetke do 80 V. Savin je izveo napajanje žarenja tetrode tako da ga dijelom iskoristi i za dobivanje negativnog prednapona prve rešetke tetrode, a



dijelom je dodatno koristio napon male baterije od 1,5 V koju je trajno ugradio u malo kućište uz šasiju. Konstrukcija spoja je takva da se baterijica uopće ne troši jer je spojena na praktički beskonačno velik otpor prve rešetke kad je prijemnik isključen tako da vijek njena trajanja ovisi samo o njenom općem fizičkom stanju.



Sl. 4.: Prvi refleksni jednocijevni prijemnik s kristalnim detektorom Lovre Savina

Na stražnjem dijelu ovog prijemnika Savin je postavio letvicu sa neoznačenih šest priključaka na električno napajanje. Snimanjem sheme otkrili smo da su dva priključka za žarenje od 4 V, jedan je masa uređaja, jedan za anodni napon i jedan za vanjski napon druge rešetke. Na šesti priključak je spojena baterija za prednapon tako da se voltmetrom, bez potrebe skidanja baterije iz kućišta, može izmjeriti stanje njene napunjenosti, odnosno potreba za zamjenom.

Regulacija glasnoće izvodi se zakretanjem unutarnje zavojnice variometra pri čemu se podešava vrijednost induktivne sprege, a time i amplituda prijemnog signala. I ovaj uređaj radi izvrsno i pokriva srednjevalno područje od točno 500 do 1500 kHz iz čega se nanovo može vidjeti Savinova strpljivost i točnost pri udešavanju prijemnih frekvencija svojih uređaja.

Utvdili smo da ovaj prijemnik daje najbolje rezultate kad se priključi na istosmjerne napone žarenja od 4 V, anodni napon od 90 V i napon druge rešetke tetrode od 50 V. Prijemnik smo priključili na Savinov vibratorski pretvarač za akumulator od 2 V i koji ima tri regulacijska potencijometra za žarenje od 0 do 10 V, te za anodne napone od 50 do 70 V, 60 do 105 V i od 60 do 135 V.

U zbirci su tri Savinova vibratorska pretvarača temeljena na vrlo poznatim i pouzdanim vibratorskim pretvornicima njemačke vojske, oznake W.GI. 2,4a, koji su se vrlo često rabili tijekom Drugog svjetskog rata, a i još danas besprijekorno rade. Najpoznatiji su po primjeni za pretvarače napona za pogon rasprostranjenih njemačkih vojnih prijemnika Torn.E.b., a očito su Savinu bili dobro poznati jer je imao pristup do njih kao dijela zarobljenog ratnog materijala na kraju rata

## REFLEKSNi 1-CIJEVNI PRIJEMNIK S KRISTALNIM DETEKT.

CIJEV TELEFUNKEN 1928. g.

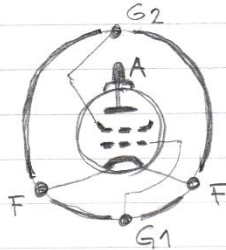
RES 094 **PENTODA**

$$U_f = 3,8 - 4V / 0,063A$$

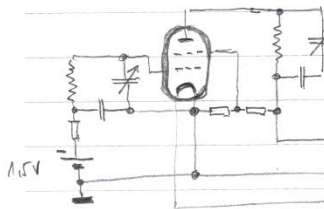
$$U_A = 200V \text{ max}$$

$$U_{G2} = 80V \text{ max}$$

$$A = 300 \times$$

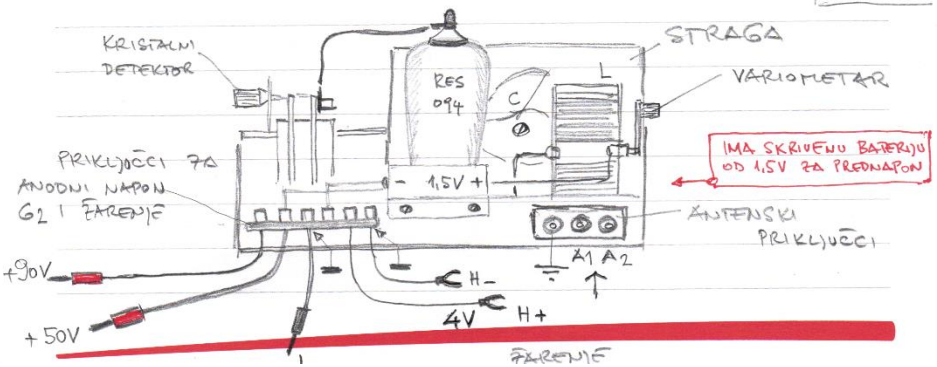
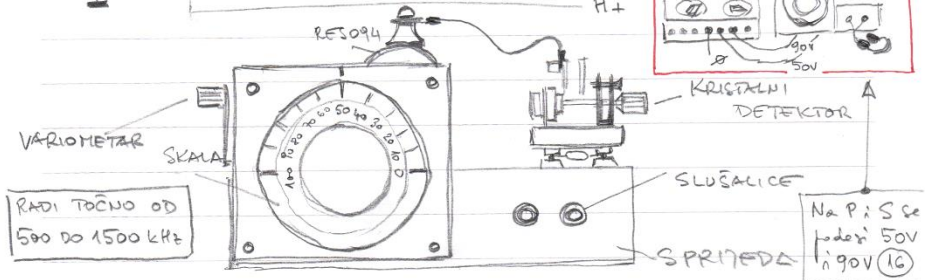
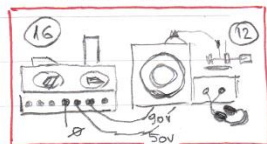


Referirao sam na  
Savinihu Brilki  
NIKOLA TESLA  
decembar 1936.



Razlika napona između A i G2 mora  
biti 50-60V (PaSo's Virtuelles...  
Schema:

Patric-sokoll.de



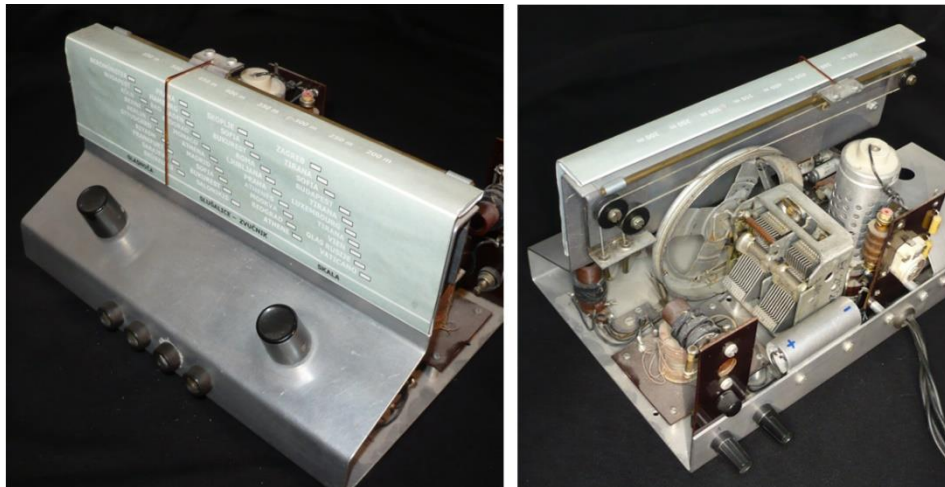
Sl. 5.: Skice iz tehničke dokumentacije prvog autora članka načinjena za refleksni jedno cijevni prijemnik s kristalnim detektorom

Fascinantna su Savinova rješenja variometara, povratnih reakcija prijemnika i načina regulacije glasnoće.

### 2.3. Jednocijevni srednjevalni refleksni prijemnik s radio cijevi RV2P800

Tijekom 1990. godine Savin gradi jednocijevni refleksni prijemnik, sl. 6., s jako poznatom i rasprostranjenom njemačkom elektronkom RV2P800 koja se proizvodila od 1936. do 1945. godine. To je bila prepoznatljiva njemačka pentoda

u aluminijskom rupičastom cilindru s izvodom za prvu rešetku na jednom i podnožjem s čepom za lako i brzo izvlačenje na drugom kraju cilindra. Predviđena je da se može priključiti na tada uobičajeni akumulator od 2 V tako da joj je napon žarenja 1,9 V uz struju žarenja od 0,18 A. Uobičajeni anodni napon je iznosio oko 120 V, a prednapon prve rešetke -1,5 V. Stoga je Savin i u tu konstrukciju uveo bateriju za dobivanje prednapona od 1,5 V skrivenu u šasiji kao i kod jednocijevnog prijemnika s kristalnim detektorom.



Sl. 6.: Savinov jednocijevni refleksni prijemnik sa skalom

Očito je da je Savin bio dobro upućen u njemačke vojne radijske uređaje i imao na raspolaganju pojedine komponentne. O tome svjedoči njegov tekst vezan uz prijemnik: „Ovaj prijemnik nije rekonstrukcija mojih radova iz mladenačkog doba, ali je dio moje prošlosti. Upravo ta moja prošlost toliko je složena da je moramo fragmentirati. Evo kako: Knin je pao, ili oslobođen. Moja jedinica useljava u napuštenu zgradu Preparandije. Tamo dolazim u radionicu za vezu. Susrećem mnoge poznate ljude. Tu je bila i škola radio telegrafista. Kao malog partizana svi su me gledali sa osmijehom (Tada je bio četrnaestogodišnjak, op. a.). Misleći što to dijete radi tu. Uz mene je bio i moj tata i mnoštvo očevih znanaca. Ali tu je bio i jedan Talijan partizan. Mlad i lijep čovjek Vittorio Fachini. Reče mi da je završio Akademiju Marconi u Rimu i da je radio amater. Ako tome dodamo moje poznavanje talijanskog, zaista sam stigao na pravo mjesto! Vittorio je održavao snažnije i složenije uređaje, prijemne i predajne i sve ono što je trebalo biti trenutno popravljeno. Moji drugari brinuli su o agregatima i akumulatorima. Meni je Vittorio povjerio lakše poslove. To su bili mali poljski primopredajnici tipa ultra audiona i manje četne stanice. Imao sam svoj mali agregat, akumulator i podosta mjernih instrumenata. Iako je moj tata bio zatočenik u njemačkim logorima, ja sam ipak brigao da sakupim ponešto hrane i za njemačke zarobljenike. Ali da se vratimo u područje radio tehnike. U industriji radio aparata masovno su se koristili prijemnici sa konverzijom frekvencije ili superheterodini, dok su njemački vojni prijemnici isključivo radili kao direktni prijemnici s baterijskim radio cijevima RV serije. Poslije rata često su korištene za radio

*amateure konstruktore. Ovo moje malo čudovište koje vam izlažem ima dva ugođena kruga, neutralizaciju Cag1, metalni detektor i automatsku regulaciju pojačanja. Posebno izveden spoj za poboljšanje faktora dobrote svih krugova i automatsko prilagođavanje antene valnoj dužini. Uz anodni napon 150 V, oglašava se zvučnikom! Ovaj prijemnik sagradio sam 1990. u znak na sjećanja na moje drugare.“*

Za ovu Savinovu konstrukciju značajno je da je uveo mehanički složen skalni pogon tako da se vrtnja promjenjivog zračnog kondenzatora više nije izvodila izravno. Na skali je naznačio područja prijema važnijih europskih difuznih radiostanica. I ovaj prijemnik su autori članka pokrenuli i radio je izvrsno, ponajbolje pri anodnom naponu od 150 V pri čemu je trošio svega 5 mA struje. Pri tome smo mu izmjerili i frekvencijsko područje prijema te utvrdili da radi u području od 550 do 1650 kHz. Na prednjoj strani prijemnika izvedene su priključnice za visokoomske slušalice i za zvučnik, a iznad njih su po prvi put gumbi za regulaciju glasnoće i pogon skale. Na stražnjoj strani su priključnice za antenu i uzemljenje te izvedene žice za anodni napon i napon žarenja elektronke.

## 2.4. Prvi dvocijevni prijemnik – Audion

Ovo je bio prvi Savinov izradak koji je imao dvije elektronske cijevi, sl. 7. Obje su bile triode Marconi LP2 iz 1930. godine s izravno žarenom katodom. Prijemnik je gradio pun uzbuđenja i načinio pri tom simpatičnu pogrešku o kojoj piše: „Prvi dvocijevni prijemnik - Audion – sagradio sam davne 1943. Ovu rekonstrukciju izveo sam 1988. izvorno sa istim sastavnim dijelovima. Na ovom prijemniku, kao i na već viđenom i slijedećem, strogo sam vodio brigu da sačuvam originalnost izvedbe. Ovo su luksuzne izvedbe sa upotrebom ebonita i aluminijske, ali u potpunosti sukladne mojem dječjačkom pristupu gradnji. Ta svojstva obilno sam koristio u arhitekturi profesionalnih uređaja, pa i stanogradnji.



Sl. 7.: Savinov dvocijevni audion

*„U ovom prijemniku ugradio sam radio cijevi, triode Marconi LP2. E, ovo vam moram ispričati: Gradnja dvocijevnog prijemnika završila je sa neuspjehom. Radio cijevi spojio sam paralelno, počinio sam veliku grešku, ali ne i štetu. Otrčao*

*sam mom učitelju Ivi Remetinu, iskusnom radioamateru i k tome učeniku viših razreda gimnazije, pokažem to moje malo čudovište izrađeno na drvenoj pločici i uredno povezano tankim žičicama posredstvom malih obučarskih čavlića. Zavojnica, zračni kondenzator, reakcijski kondenzator, podnožja i ostalo lijepo i simetrično složeno. Moj učitelj skine naočale, pogleda, nasmiješi se i reče: Lovre, izostavio si niskofrekventni vezni transformator. Uzmi ovaj transformator, upravo taj omjer pojačanja 1/4 odgovara ti. Transformator ćeš spojiti kada dođeš kući. Ne zaboravi uzeti ove radio časopise koje sam ti pripremio. Tu su ti sva izdanja Jugoslavenskog Radio časopisa Tesla od 1935. pa do početka rata.“ To je bio stručni i popularni almanah za radiofoniju, televiziju i drugu primjenu Teslinih struja i radio valova. Glavni urednik časopisa bio je inž. D. Milosavjević, direktor pošta i telegrafa u Novom Sadu. Moji učitelji više nisu među nama. Ostala su samo sjećanja na davna i lijepa vremena. Upravo su tu pored mene časopisi Tesla. Oni mi pružaju radost bivstovanja u trećoj životnoj dobi. Moj slijedeći rad temelji se na stranicama ovog časopisa.“*

I ovaj prijemnik ima ebonitnu prednju ploču i lijepo je vizualno i strukovno izveden. Na prednjoj ploči su simetrično raspoređeni gumb za reakciju, prekrasna skala iz doba ranih tridesetih godina prošlog stoljeća u sredini ploče za traženje stanica, a desno je smjestio reostat za regulaciju struje žarenja kojom je regulirao glasnoću u slušalicama na način da je utišavanje tona izveo smanjenjem struje žarenja i emisije elektronke. Elektronke se žare naponom od 2 V uz struju od 200 mA, a Savin ih je spojio serijski tako da smo uređaj priključili na napon žarenja od 4 V. Prema tvorničkim podacima uz anodni napon od 150 V i prednapon rešetke od -4,5 V kroz elektronku teče struja od oko 7 mA. Mi smo, priključenjem Savinovog uređaja na anodni napon utvrdili da najbolje radi na naponima od 60 do 80 V pri čemu obje elektronke troše oko 10 mA anodne struje. Isto tako smo utvrdili da prijemnik pokriva radiodifuzijski zanimljiv dio kratkovalnog područja te da se amplitudno modulirane stanice izvrsno čuju. Slušali smo i kratkovalne radioamaterske opsege na 7 MHz (skala na podioku 20) i na 14 MHz (skala na podioku 80) i utvrdili da se vještım podešavanjem gumba za reakciju izvrsno mogu primati telegrafski signali, a uz malo strpljivosti pri namještanju čuju se i stanice koje rade SSB tipom modulacije.

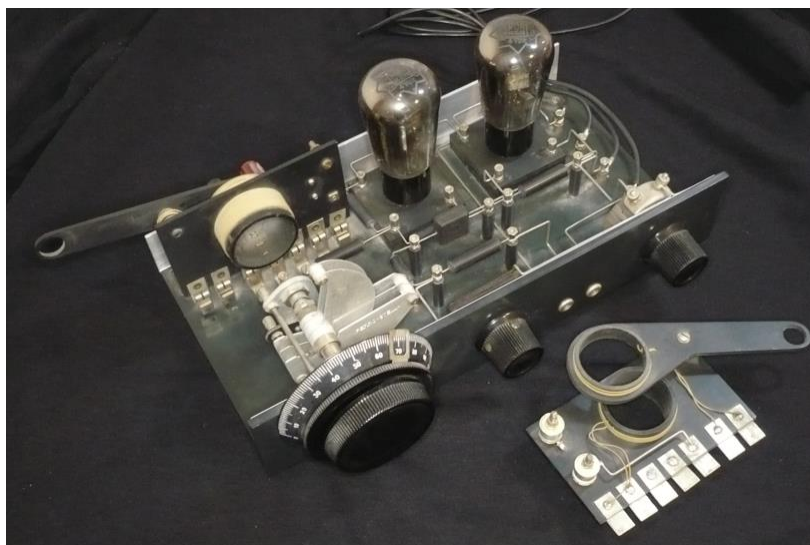
## **2.5. Uskopojasni kratkovalni prijemnik za prijem radioamaterskih područja: 3,5-7-14 MHz**

Kako se Savin bavio i radioamaterstvom za očekivati je bilo da će sagraditi i neki lijep prijemnik koji neće primati široki spektar kratkog vala već samo uski spektar kratkovalnih radioamaterskih područja. Sagradio je dvocijevni prijemnik, sl. 8., temeljen na elektronkama Telefunken RE074, triodama s izravno žarenom katodom iz 1926. godine.

O tome piše: „Ovaj dvocijevni Audion specijalne je građe. To nije rekonstrukcija iz mog mladenačkog doba. Ovo je novogradnja iz 1998. u mojoj 68. godini ili u trećoj životnoj dobi koju sam namijenio sjećanju na minula vremena, ljude i događaje. Moji zahtjevi bili su da sagradim prijemnik koji će predstavljati kako estetska tako i tehnička dostignuća tog vremena. Sama



*slučajnost mi je to omogućila. Moja obiteljska prijateljica Filka Studin Ratković, sestra mog preminulog prijatelja Dragana Studin, pozove me da mi uruči pronađene radio cijevi iz Drugog svjetskog rata. Na moje veliko iznenađenje, te radio cijevi bile su originalno pakovane i sačuvane. Kada je Filka shvatila moju radost oboje smo zagrljeni plakali i prisjetili se da mi je Dragan često poklanjao, ali nove serije radio cijevi. Vratimo se mojoj „Staro-novogradnji“. Upravo u toj hrpi radio cijevi pronađeno je podosta trioda sa naslovom RE074 neutro. Pregledom mjesečnika WISSEN und FORTCSHRITT za DEZ.1927. na strani 361, najavljene su dvije nove „Telefunken radio cijevi“ iz serije RE000. Osim spomenute RE074, najavljena je i RE134 koju ne posjedujem. Šteta! Upravo te dvije radio cijevi projektirane su za gradnju kofer prijemnika sa olovnim akumulatorom i anodnom baterijom.“*



Sl. 8.: Savinov dvocijevni audion za radioamaterske frekvencije s umetajućim variometrom

Osim fantastično lijepog rasporeda gradbenih elemenata i nevjerojatno lijepe estetike, Savin je na ovu konstrukciju prenio velik dio svog znanja. Na prednju ploču (opet od ebonita) lijevo je postavio veliki gumb za namještanje prijemne frekvencije, desno od njega gumb za namještanje povratne veze tako da je mogao primati telegrafске i fonijske signale, potom priključke za slušalice i posve desno gumb reostata za žarenje s pomoću kojeg je regulirao glasnoću tona na način kako smo to već opisali u prethodnom tekstu. U specifičnosti ove konstrukcije može se ubrojiti i specifični variometer Savinove jednostavne, a vrlo učinkovite izvedbe. Polužicom smještenoj na lijevoj strani uređaja može pomicati antensku zavojnicu spram fiksirane zavojnice ulaznog titrajnog kruga mijenjajući međuinduktivitet odnosno faktor međusobne sprege, utječući time i na selektivnost ulaznog titrajnog kruga. Zanimljivo je i to da je njegov variometar zamjenjiv, umetajući, i da svaki ima dodatni zračni kondenzatorski trimer za fino podešavanje prijemne frekvencije. Savinov prijemnik, po njegovim podacima, može primati tri

radioamaterska područja, no mi smo pronašli samo variometre za tzv. 80 i 40 metarsko valno područje, a za 20 metarsko područje je variometar najvjerojatnije zagubljen. Priključenjem ovog audiona na napon izmjerili smo da na 80 metarskom području prijemnik izvršno prima signale frekvencija od 3,425 do 3,805 MHz, a na 40 metarskom od 7,000 do 7,080 MHz. Utvrdili smo da najbolje radi pri anodnom naponu između 80 i 100 V i anodnoj struji od 20 mA. Ne treba posebno isticati izvršnu osjetljivost i dobru selektivnost prijemnika i mogućnost primanja CW i SSB signala, karakterističnih za amatersko područje.

## 2.6. Srednjevalni baterijski koncertni prijemnik s njemačkim vojnim radio cijevima proizvedenim 1938. godine

Ova Savinova konstrukcija pripada među estetski najljepše u njegovom opusu, sl. 9., jer oponaša estetiku gradnje radijskih prijemnika iz doba pred Drugi svjetski rat. Temelji se opet na primjeni njemačkih ratnih elektronki, pentoda RV2P800 i RL2P3 koje su se proizvodile između 1935. i 1945. godine.



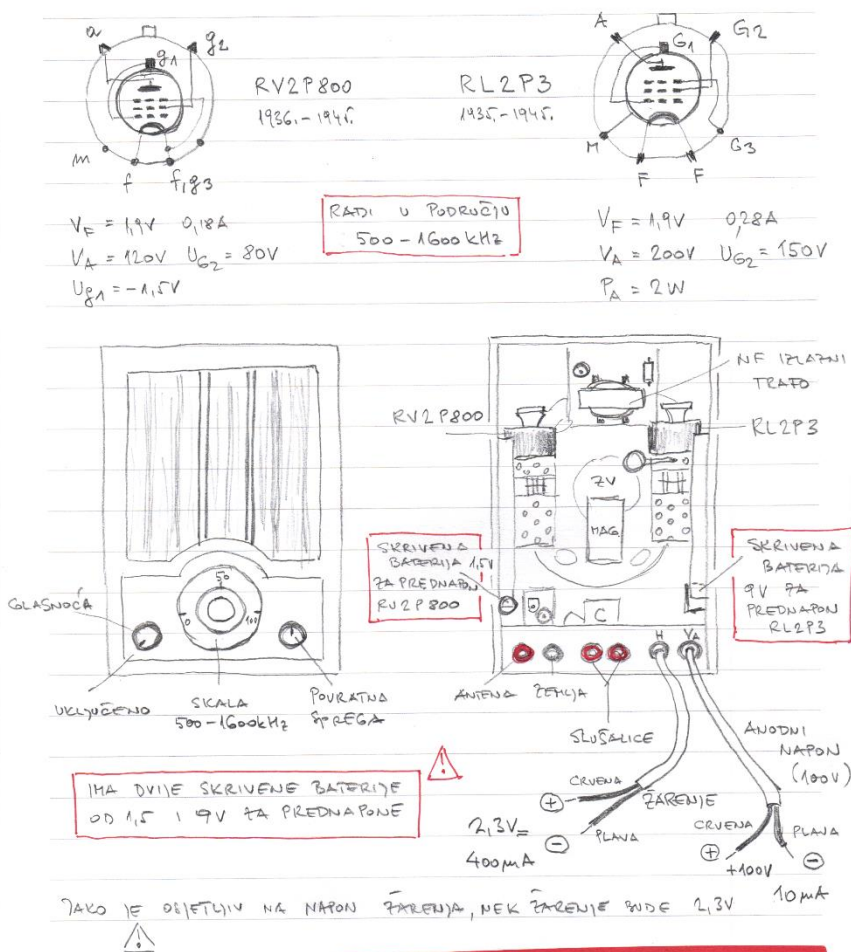
Sl. 9.: Savinov baterijski koncertni prijemnik

O njemu je Savin ostavio zabilješku: „Ovo nije rekonstrukcija, već novogradnja posvećena sjećanju na lijepa minula vremena koje sam proveo u poratnim godinama u izobilju telegrafskih, telefonskih, radio prijemnih i predajnih uređaja. Ponovno koristim RV seriju, ali ovaj put to radim sa ciljem da vam predstavim i zvučnik iz tih vremena. Zvučnik je slobodno titrajući vibrator sa potkovičastim permanentnim magnetom! Takav zvučnik koristio se davne 1927. ali izvan prijemnika. Stolni ili viseći, po potrebi. Prijemnik sam projektirao kao refleksi spoj sa dva ugođena kruga. Radio cijev RV2P800 radi kao VF pojačalo i

niskofrekventno predpojačalo za izlaznu radio cijev RL2P3. Povratnu spregu ostvario sam sa zaštitne rešetke i na taj način prvi krug je dominantan. Zahvaljujući automatskoj regulaciji pojačanja, kao i mekoj povratnoj spregi, cijelo valno područje 180 – 600 m vrlo je osjetljivo i selektivno! Kućište sam uradio od drveta i vjerujem da sam i to estetski osmislio. Ako želimo štedjeti akumulator, priključite slušalice. One će automatski isključiti grijanje izlazne radio cijevi i smanjiti potrošnju za 0,29 A. Štedni spoj „Sparshaltung“! Akumulator Ni-Fe 2,4 V za zagrijavanje. Anodna baterija 80 – 100 V. Anodna struja oko 10 mA.“

Naravno da smo i ovaj prijemnik pomno snimili, sl. 10., i njemu pronašli niz novih zanimljivosti.

### SV BATERIJSKI KONCERTNI PRIJEMNIK S RV2P800 I RL2P3



JAKO JE OSJETLJIV NA NAPON ŽARENJA, NEK ŽARENJE BUDE 2,3V

500-1600kHz 400mA 10mA IMAO JE PREKLAPANJE ŽARENJA

RL2P3 (kontakt Sparshaltunga)



Sl. 10.: Dokumentacija autora pri pokretanju Savinovog baterijskog koncertnog prijemnika

Prije svega i ova izvedba plijeni estetikom izvedbe, a uz to ima ugrađen specifični zvučnik kojeg je Savin netom opisao, a bio je karakterističan za ono doba. Na prednjoj lijevoj strani uređaja montiran je gumb potenciometra za glasnoću s prekidačem za uključenje, u sredini je estetski lijepo smješten veliki građuirani gumb za podešavanje prijemne frekvencije i desno gumb povratne sprege.

Na stražnjoj strani nalazi se priključak za antenu i uzemljenje, priključci za slušalice i dva izdanka žica za žarenje i anodni napon. Pri priključenju prijemnika na napon se začudo nije ništa dogodilo.

Tražeći kvar naišli smo u unutrašnjosti na dvije skrivene baterije, jednu od 1,5 V za prednapon pentode RV2P800 i jednu od 9 V za prednapon izlazne pentode RL2P3. Obje su se baterije ispraznile i korozija je već nagrizla njihova kućišta. Zamjenom baterija kvar nije uklonjen pa smo nastavili s traženjem i našli da je prekid u kontaktu štednog spoja o kojem je pisao Savin da ga je postavio radi štednje baterija. Malo spreja za kontakte odmah je riješilo problem i prijemnik je proradio pri naponu žarenja od 2,3 V i struji od 0,4 A, te na anodnom naponu od 100 V i struji od 10 mA.

Mjerenjima signal generatorom smo utvrdili da izvrsno radi u području frekvencija od 500 do 1600 kHz uz dobru osjetljivost i selektivnost.

## **2.7. Četverocijevni superheterodin sa serijom A/1936. godine s ugrađenim magičnim okom**

Savin je, nakon niza gradnji jednocijevnih i dvocijevnih, izgradio i trocijevni prijemnik kojeg je nazvao Radio s utičnim zavojnicama srednji i kratki val s cijevima Tungsram AF3 visokofrekventnom pentodom iz 1934. g., ABC1 dvostrukom diodom i triodom iz 1934. g. i AL4 izlaznom pentodom iz 1936. godine koji je također doniran Zbirci. Radio je imao skalni pogon, napajao se iz Savinova transformatorskog ispravljača s elektronkom AZ1 koji je davao 250 V istosmjernih za anodne napone i 4 V izmjeničnih za žarenje elektronke (doniran Zbirci) te na Savinov zvučnik ugrađen u (opet) estetski vrlo atraktivnu kutiju (također doniran Zbirci). Uređaj je karakterističan po umetajućim zavojnicama za valna područja, a na prednjoj ploči ima smješten potenciometar za glasnoću, gumb reakcijskog kondenzatora i gumb za skalni pogon.

No, četverocijevni superheterodin oznake RLS 2007 zacijelo je Savinov najsloženiji prijemnik u njegovom opusu. Kao da je njime htio prikazati da može konstruirati i najsloženije uređaje s elektronskim cijevima. Pri tome, izgleda da nije mogao odoljeti izazovu pa je i za ovu gradnju koristio vrlo stare elektronke: Philips Miniwatt AK2 iz 1935. g. kao lokalni oscilator i miješalicu, AF3 iz 1934. g. kao međufrekvencijsko pojačalo, ABL1 iz 1937. g. kao demodulator i izlazno niskofrekvencijsko pojačalo te EM4 iz 1939. g. kao magično oko. Prijemnik je koncipiran vrlo suvremeno, ima četiri valna područja: dugi, srednji i dva segmenta kratkog vala. Napaja se iz vanjskog ispravljača s ugrađenim zvučnikom, također

Savinove konstrukcije i izvedbe.

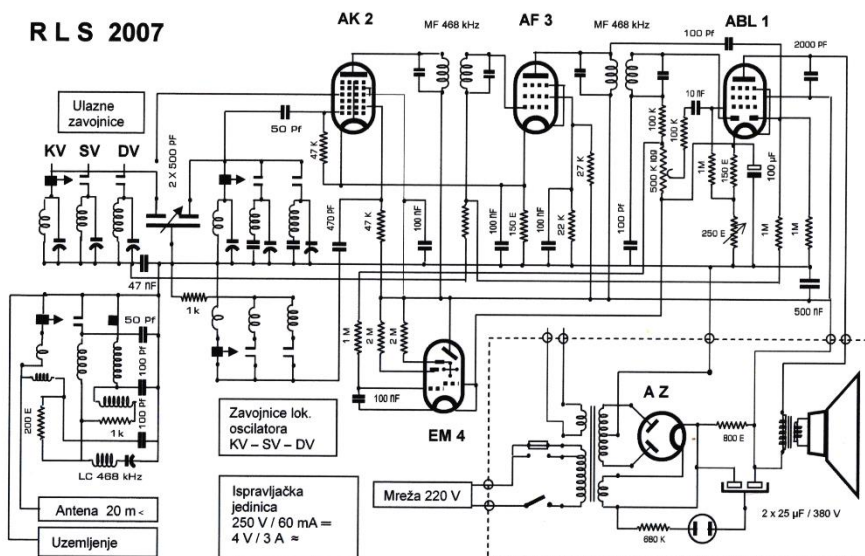
Prijemnik je sa skalom, nevjerojatno solidno i estetski lijepo izveden, sl. 11. Šasija predstavlja minijaturno estetsko i mehaničko remek djelo, a prijemnik je vrlo osjetljiv, selektivan i radi izuzetno lijepo. Šteta da na srednjem i dugom valu nema nekadašnjeg mnoštva difuznih radiostanica, ali sve se daje nadoknaditi slušanjem kratkog vala gdje još uvijek ima aktivnih postaja.

U oskudnoj dokumentaciji koju smo našli pronađena je pregledna i estetski lijepo koncipirana shema prijemnika RLS 2007, sl. 12.

Elektroničku shemu prikazanu na sl. 12., je uz pomoć računala u 77. godini života načinio Lovre Savin. Iz dokumentacije smo razabrali da je tako načinio nacрте za mehaničku izvedbu prijemnika te dizajn skale s naznačenim prijemnim frekvencijama. Ovi detalji dodatno obilježavaju Lovru Savina kao iznimno tehnički nadarenog pojedinca s ogromnom znatiželjom i voljom za savladavanjem najsloženijih tehničkih novotarija i u poznim godinama svog bogatog života.



Sl. 11.: Savinov četverocijevni superheterodinski prijemnik sa zvučnikom



Sl. 12.: Shema superheterodinskog prijemnika RLS 2007 koju je Savin izradio računalom

Za kraj ovog poglavlja s prikazom sedam izabranih zanimljivih prijemnika Savinove konstrukcije i izvedbe poglavlje se može zaključiti njegovim riječima iz veljače 2006. godine: „*U izvornoj samogradnji koristio sam pravokutni posrebrjeni bakreni samonosivi provodnik. Svi sastavni dijelovi imaju zavrtnje s rukohvatom. Ovo je samo uvodni dio u moje radove, ali dovoljan za uvid u svu ljepotu i sadržajnost moje mladosti koja koincidira sa mladenačkom dobi opće tehničke kulture. Ove prijemnike rekonstruirao sam tijekom 1990. Ovo je samo fragment mojih radova. Za pretpostaviti je da vam je poznato da su ovo baterijski prijemnici. Osim Audiona, trebate imati izvore napajanja. To su akumulator i anodna baterija. Dugačku i visoko postavljenu antenu, uzemljenje kao i dobre visoko omske naglavne slušalice.*“

### 3. Odašiljač Lovre Savina

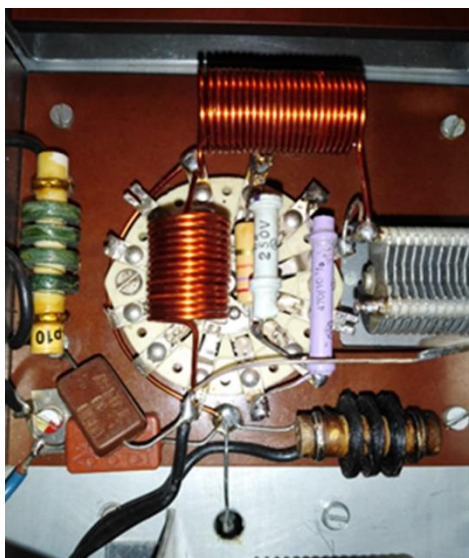
Pred kraj života Lovre Savin se upustio u gradnju respektabilnog odašiljača za radioamaterska područja od 14, 7 i 3,5 MHz, sl. 13.



Sl. 13.: Stražnja strana Savinovog nezavršenog odašiljača

Svoju gradnju, na žalost, nije stigao završiti. Međutim, odašiljač je, s mehaničkog aspekta, ipak uspio u cijelosti završiti pri čemu je opet pokazao svoju mehaničku ingenioznost i sklonost dizajnu. Šasija uređaja je izuzetno lijepo izvedena i polakirana. Sve rupe za komponente su bile izbušene i svi dijelovi

montirani, uključujući i podnožja za elektronske cijevi, a čak su i elektronke bile utaknute u podnožja. K tome, Lovro Savin je uspio zalemiti sve elemente vezane uz promjenjivi oscilator (VFO) i doubler/tripler frekvencija, a izlazni stupanj, napajajući razvod i preklapanje prijem/predaja je ostalo netaknuto. Iz poštovanja prema djelu Lovre Savina, prvi autor članka je odlučio završiti njegovo djelo sve do pune funkcionalnosti. Pri tome je od pomoći bilo studiranje Savinovog tehničkog razmišljanja na njegovim prijemnicima i autorovo dosadašnje iskustvo, a velika nevolja nedostatak bilo kakve Savinove dokumentacije. K tome je trebalo i ovdje pomno prostudirati njegova tehnička rješenja i proniknuti u njegove namjere. Ubrzo je postalo očito da Savin nije stigao ispitati svoje djelo i da postoji nekoliko pogrešaka koje bi on, da je stigao, sigurno lako uočio i ispravio. To se odnosi na VFO i stabilizator napona te na sklop doubler/tripler. Kod VFO-a je bilo krivo spojeno nekoliko vodova što je ispravljeno, a kod doublera/triplera je trebalo intervenirati i u spoju i u odabiru komponenata jer ga je trebalo udesiti na rezonantne frekvencije. Na sl. 14., vidljivo je Savinovo rješenje (a) na tom sklopu i nakon prespajanja i udešavanja sklopa (b). Desni dio odašiljača za distribuciju napajanja također nije bio napravljen, sl. 15a., kao ni VF preklapanje antena pri prijemu i odašiljanju.



a.



b.

Sl. 14.: Sklop doublera/triplera prije i nakon prepravljavanja

Prvi autor članka je to riješio prema svom iskustvu, sl. 15b, a posebno je lijepo izrađen spoj koaksijalnim kablovima s releja na konektore koje je montirao Savin. Tako je intuitivno pogodeno Savinovo rješenje koje je vjerojatno i on, na približan način, planirao u tom dijelu odašiljača.

Na sličan način izvedeno je i spajanje izlaznog stupnja. Na sl. 16. prikazani su izrađeni posrebrjeni supresori montirani na anodne kapice izlaznih cijevi, a iza pregrade na koju je montirana VF prigušnica na napajanje cijevi, smješten je

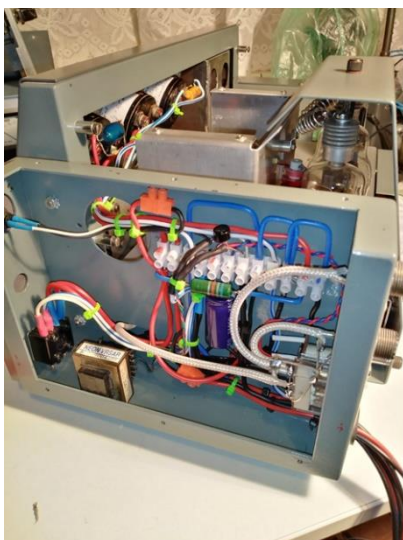


Collins Pi filter kao dio za prilagođenje impedancije izlaznih cijevi na impedanciju antene.

Uz izlazni dio načinjen je i sklop za napajanje i mjerenje radnih struja. Savin je predvidio da njegov odašiljač ima tri mjerna ampermetra. Za pretpostaviti je bilo da je želio mjeriti pobudnu struju prvih rešetki pentoda što je važno za ispravnu pobudu izlaznog stupnja, struju drugih rešetki koja indicira uspješnost prilagodbe impedancija cijevi na antenu i ukupnu anodnu struju izlaznih elektronki koja ne smije premašiti dozvoljenu maksimalnu struju izlaznih elektronki. Stoga su u tom dijelu proračunati shuntovi za miliampermetar od 10 mA za struju prvih i od 50 mA za struju drugih rešetki te od 250 mA za anodnu struju izlaznih elektronki.



a.



b.

c.

Sl. 15.: Dio odašiljača namijenjen distribuciji napajanja i upravljanju prijem/predaja

Odašiljač Lovre Savina radi izvrsno i stabilno. Promjene anodnog napona od  $\pm 30$  V praktički ne utiču na promjenu frekvencije, a komponente su tako dobro odabrane da je vremenski pomak frekvencije (unutar stotinjak Hz) praktički zanemariv za održavanje radioamaterskih veza. Izmjerili smo da daje 31 W VF snage na umjetnoj anteni impedancije  $50\ \Omega$  pri anodnom naponu od 750 V i anodnoj struji od 82 mA. Korisnost mu je nešto veća od 50 % što je za amaterski uređaj s takvim komponentama jako dobro. Zacijelo bi izlazna snaga bila veća da je u izlazu par elektronki istog proizvođača, a uz to nismo bili sigurni ni koja je starost elektronki i kakva im je katodna emisija. Za napajanje odašiljača potrebna su četiri naponska izvora: za žarenje od 6,3 V, za anodni napon oscilatora i doublera/triplera od 250 V, prednapon izlaznih elektronki od -30 V te anodni napon izlaznih elektronki od 750 V.



Sl. 16.: Izlazni stupanj 2x807 sa supresorima i VF prigušnicom

Na sl. 17. vidljiva je prva faza ispitivanja odašiljača s ispravljačima i

apsorpcijskim vatmetrom Marconi Instruments TF 2503, i s priključenim naponima bez aktiviranog telegrafskog tipkala, a na sl. 18 s aktiviranim tipkalom s emisijom u umjetnu antenu.



Sl. 17.: Prva faza ispitivanja pri svim naponima bez aktiviranog tipkala





Iz poštovanja prema Lovri Savinu nismo htjeli mijenjati cijevi koje su njegove ruke postavile u podnožja, a snaga od tridesetak vata je ionako zacijelo dovoljna da se uspostave veze s europskim zemljama, a pri dobrim kratkovalnim propagacijama i dalje. Na godišnjicu dolaska njegove donacije pokušati ćemo uspostaviti i prve telegrafske veze s njegovim odašiljačem.

## Zaključak

Bilo bi dobro da smo mogli opisati i prikazati svih 15 djela gradnje ranih radijskih uređaja Lovre Savina koji su izrađeni u poznijim godinama njegovog života, prikazanog iz tog doba sa suprugom sl. 19a. Uređaji su izrađeni s takvom fascinantnom preciznošću i vjernošću te korištenjem izvornih komponenti i materijala tako da je praktički nemoguće odrediti pravu dob nastanka uređaja. Osim tehničkog umijeća, Savinovi projekti imaju i sjajnu dizajnersku notu vidljivu iz fotografija njegovih uređaja, a o kojoj i sam piše u u točki 2.4. o uporabi sličnih materijala u gradnji radijskih uređaja, a koje je uspješno dizajnerski koristio i pri gradnji svoje obiteljske kuće, sl. 19b. Sve to ukazuje na iznimnu tehničku, pa i likovnu, nadarenost ovog iznimnog čovjeka.



Sl. 19.: Lovre Savin i njegova supruga Fanika u poznijoj dobi života i njihova obiteljska kuća

Njegovi uređaji zacijelo predstavljaju najcjelovitiju zbirku djelujućih pokaznih radijskih uređaja iz ranog doba svog nastanka u Hrvatskoj i sada su trajno pohranjeni u Prvoj hrvatskoj zbirci mjerne i komunikacijske opreme.

Nadamo se da smo uspjeli prikazati svu raskoš stvaralaštva i sposobnosti Lovre Savina te njegovu filantropsku želju da, prione radu, načini i ostavi u nasljeđe zbirku i mnoge artefakte koji vjerno ocrtavaju početke razvoja radijske



tehnike u svijetu, a posebno su značajni kao tehničko naslijeđe i ostavština u Hrvatskoj.

Jedinu malu zamjerku autori bi mogli uputiti na nedostatak tehničke dokumentacije, nedostatak natpisnih pločica na izradcima i na elementima za električno napajanje uređaja. No, ti mali nedostaci prevladani su marom autora članka koji su pomno i studiozno proučili sva Savinova djela, pa čak dijelom i pronikli u način njegova tehničkog razmišljanja te su načinili novu dokumentaciju. Kao da nas je Savin time smisljeno htio natjerati da detaljno proučimo konstrukciju njegovih uređaja i u njima mnoga tehnička rješenja koja je povijesno preuzimao iz svjetske literature ili ih je sam stvarao. Time je postigao dvije stvari: na temelju te dokumentacije svi uređaji su pažljivo puštani u pogon nakon višednevnih kondicioniranja elektronike i zahvaljujući tome možemo kazati da su baš svi uređaji pokrenuti i da ispravno rade na ponos svog stvaratelja Lovre Savina, i drugo, da steknemo dovoljno znanja kako bi ih uspješno prenijeli drugima objavom ovog rukopisa. Nadamo se da smo u tome, barem malim dijelom

## Literatura

- [1] D. Rogale, S. Fajt, Ž. Knezić, D. Lukša: Prva hrvatska zbirka mjerne i komunikacijske opreme, *Zbornik Povijest i filozofija tehnike 7. simpozij PIFT 2018.*, Zagreb, Hrvatska, svibanj 2018., str. 355-364
- [2] D. Rogale: Struktura i artefakti Prve hrvatska zbirke mjerne i komunikacijske opreme, *Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske za 2019. godinu: Hrvatska tehnička i industrijska baština*, Zagreb, Hrvatska, str. 323-338
- [3] Kazivanje Davora Rodina, Savinovog najboljeg prijatelja, rođenog u Kaštel Lukšiću 1930. godine.
- [4] Kazivanje Mladena Mande, rođenog 1952., nećaka Lovre Savina.

Dubravko Rogale  
Željko Knezić  
Dominik Žanić  
Sanja Acalija

dr. sc. Ivan Šimatović, dipl. ing. el.  
neovisan istraživač / independent researcher  
[ivan0simatovic@gmail.com](mailto:ivan0simatovic@gmail.com)

## TESLINI LONGITUDINALNI STACIONARNI VALOVI ELEKTRIČNOG SKALARNOG POTENCIJALA

**Sažetak:** Nikola Tesla je u Coloradu Springsu početkom ljeta 1899. godine otkrio u atmosferi longitudinalne stacionarne valove električnog skalarnog potencijala ekstremno niskih frekvencija. Oni bi nastali nakon udara munje u tlo superpozicijom odlazećeg i reflektiranog vala duž vertikalne valne zrake te bi dugo trajno živahno titrali između više atmosfere i tla. Pri tom im je jedan čvor uvijek bio na tlu, na mjestu udara munje. Zbog uzdužnog stacionarnog titranja skalarnog električnog potencijala i pripadnog uzdužnog električnog polja oni su se bitno razlikovali od transversalno-vektorskih hercijanskih valova pa ih je Tesla stoga nazvao nehercijanskim valovima. Radi uzdužnog titranja zbunjivali su fizičare koji su držali da ono nije moguće bez etera. Njihovo uzdužno titranje je moguće jer ga, umjesto etera, kao medij, omogućuju slobodni električni naboji (ioni) u golemoj rezonantnoj šupljini između tla i više atmosfere. Polazeći od jednadžbe stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala i jednadžbi klasične elektrodinamike dokazano je da oni u valnoj fronti nemaju prateće dinamičko magnetsko polje. Dokazano je da je za opisivanje longitudinalnih stacionarnih valova, od četiri jednadžbe elektrodinamike, dovoljna samo treća nehomogena (Poissonova) parcijalna diferencijalna jednadžba koja određuje valnu razdiobu vertikalne gustoće slobodnih naboja u atmosferi. Zbog izostanka pratećeg magnetskog polja oni ne podliježu Lenzovom zakonu i stoga su vrlo prodorni.

**Ključne riječi:** longitudinalan stacionaran val, električni skalarni potencijal, električno polje, struja pomaka, uzdužno titranje, rezonantna šupljina, slobodni naboji, jednadžbe elektrodinamike, Poissonova jednadžba

## TESLA'S LONGITUDINAL STATIONARY WAVES OF THE ELECTRIC SCALAR POTENTIAL

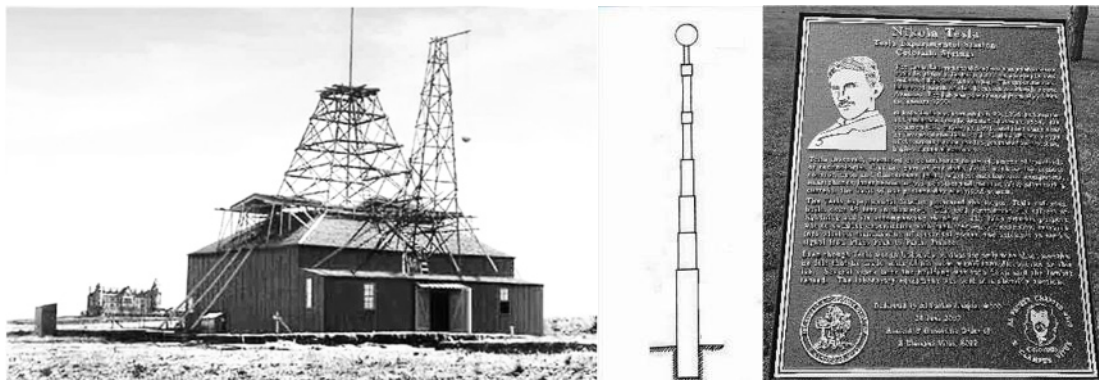
**Abstract:** In the early summer of 1899 in Colorado Springs, Nikola Tesla discovered the existence of longitudinal stationary waves of the electric scalar potential in the atmosphere with extremely low frequencies. They would form after lightning strike the ground by superposition along the vertical wave beam of the departing and reflected wave, and would vibrate lively for a long time between higher atmosphere and the ground. At the same time, one of their nodes was always on the ground, at the place of the lightning strike. Due to the longitudinal stationary oscillation of the scalar electric potential and the corresponding longitudinal electric field, they differed significantly from the transversal vector of Hertzian waves, so Tesla called them non-Hertzian waves. Due to the longitudinal vibration, they confused physicists who thought that it was not possible without aether. Their longitudinal oscillation is possible, without existence of aether, because it is supported, as a medium, by free electrical charges (ions) in huge resonant cavity between the ground and the higher atmosphere. Starting from the equation of the stationary wave of the electric scalar potential and the equations of classical electrodynamics, it has been proved that they in wave front do not contain an accompanying dynamical magnetic field. To describe longitudinal stationary waves, of the four equations of electrodynamic, is sufficient only the third inhomogeneous Poisson's partial differential equation that determine the wave distribution of the vertical density of free charges in atmosphere. Due to the absence of an accompanying magnetic field, they do not obey Lenz's law and are therefore very penetrating.

**Key words:** longitudinal stationary wave, electric scalar potential, electric field, displacement current, longitudinal oscillation, resonant cavity, free charges, equations of electrodynamic, Poisson's equation

## Uvod

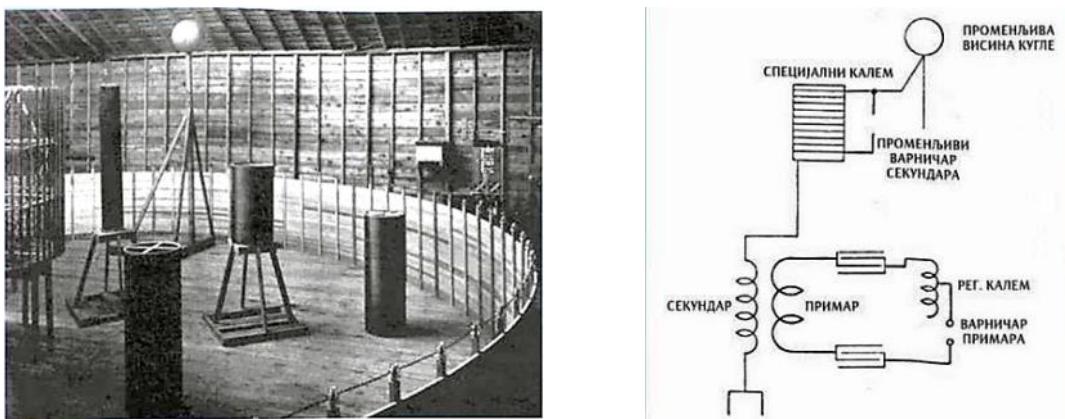
U svibnju 1899. godine Nikola Tesla je, s nekoliko stručnih suradnika, otputovao iz New Yorka u Colorado Springs i tamo je, na prostranoj ravnoj ledini obližnje uzvisine Knob Hill, podigao eksperimentalnu visokonaponsku stanicu (Slika 1) koja se napajala dalekovodom (rešetkasti stup iznad ulaza u stanicu) iz, za tadašnje poimanje, snažne hidroelektrane udaljene desetak kilometara. Nedaleko te lokacije je danas park u gradskom središtu sa spomen pločom Nikoli Tesli postavljenom krajem srpnja 2017. godine.

Istraživačka oprema bila je smještena u drvenoj baraci tlocrtne veličine 18×21 m. Nad središnjim dijelom njezinog krova uzdizala se piramidalna rešetkasta drvena konstrukcija duž čije osi se protezao metalni antenski stup teleskopske izvedbe usađen u djelomično ukopanom masivnom drvenom postolju obloženom debelim slojem bitumena pa je na taj način bio izvrsno izoliran od tla.



Slika 1 – Teslina eksperimentalna visokonaponska stanica na ledini kod Colorado Springsa, teleskopski antenski stup i spomen ploča Nikoli Tesli u središnjem gradskom parku

Antenski stup je imao šest izvlačivih cijevnih segmenata, a na njegovom vrhu bila je učvršćena kugla od brončanog lima promjera 76 cm koja se mogla kontinuirano podizati iznad tla u rasponu visina od 17 m do 51 m. Stup je bio priključen na poseban ogroman terciarni svitak sofisticiranog tronamotnog rezonantnog pojačavajućeg odašiljača (*magnifying transmitter*) bez feromagnetske jezgre. Unatoč tome njegovi namoti bili su veoma dobro međuinduktivno povezani. Teslinim genijalno koncipiranim pojačavajućim odašiljačem bilo je moguće rezonancijom namota proizvesti napone od desetak MV i frekvencija do stotinjak kHz i uzdužne putujuće električne skalarne valove. [1].



Slika 2 – Teslin ogroman tronamotni pojačavajući odašiljač i njegova shema [1]

Predmet ambiciozno planiranih opsežnih Teslinih istraživanja u Coloradu Springsu, koja su započela početkom lipnja 1899. godine i trajala su do početka siječnja 1900. godine, bio je:

- mjerenje električne vodljivosti zraka,
- iznalaženje mogućnosti bežičnog prijenosa električne snage i energije na veće udaljenosti te
- bežična telegrafija na vrlo velike (interkontinentalne) udaljenosti.

## 1. Nikola Tesla otkriva longitudinalne stacionarne valove električnog skalarnog potencijala

Tijekom vrlo olujne noći 3./4. srpnja 1899. godine, dok su na širem području Colorado Springsa učestalo i žestoko sijevale munje, Nikola Tesla je osjetljivim rotirajućim kohererom<sup>1</sup> priključenim na antenski stup, koji se te noći neočekivano više puta spontano aktivirao, neplanirano pukim slučajem otkrio postojanje u atmosferi dotad fizici nepoznatih prirodnih longitudinalnih stacionarnih harmonijskih valova električnog skalarnog potencijala ekstremno niskih frekvencija (ELF) u rasponu od osam pa do nekoliko desetaka herca.

U pedantno vođenim opsežnim *Zabilješkama iz Colorado Springsa* [2] on je njihovo otkriće ushićeno opisao ovako:

"4. srpnja 1899.

*Ovo je bilo predivno i najzanimljivije iskustvo sa znanstvenog gledišta. Jasno je pokazalo postojanje stacionarnih valova, jer kako bi se promatranja mogla drukčije objasniti? Kako ti valovi mogu biti stacionarni ako se ne reflektiraju i odakle se mogu reflektirati ako ne s mjesta s kojeg su krenuli? Bilo bi teško povjerovati da su se reflektirali sa suprotne točke Zemljine površine, premda je i to možda moguće. Ali radije mislim da se reflektiraju s točke oblaka gdje je započela provodna staza; u ovom slučaju mjesto na kojoj je munja udarila u tlo bila bi čvorišna točka. Sad je sigurno da se oni mogu proizvesti oscilatorom.*

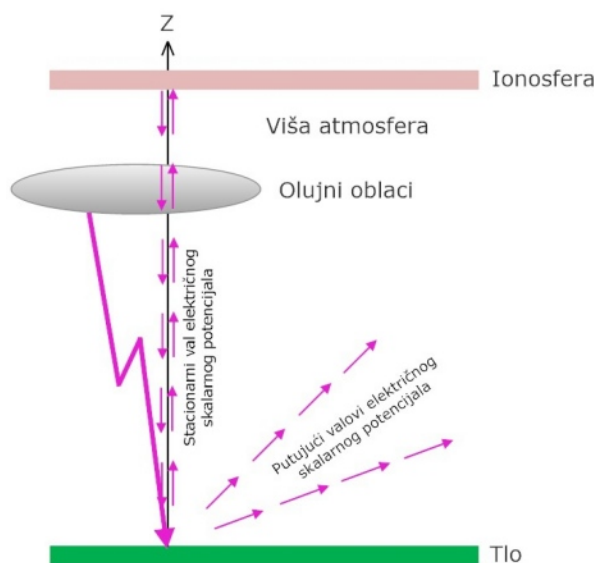
*(Ovo je od ogromne važnosti)"*

Tesla se nije upuštao u zahtjevnu matematičku analizu njihovog funkcioniranja jer mu oni, kao usputno otkriće, tada nisu bili istraživački prioritet.

## 2. Kako nastaju longitudinalni putujući valovi i stacionaran val električnog skalarnog potencijala?

Zbog udara munje iz električki nabijenih olujnih oblaka u tlo i intenzivne ionizacije slobodni naboji (ioni i elektroni) raspršeni u atmosferi i električni skalarni potencijal koji oni grade superpozicijom dožive trenutačnu drastičnu promjenu i spontano živahno zatitraju pa nastaju longitudinalni putujući valovi električnog skalarnog potencijala. Od mjesta udara munje u tlo oni se radialno šire atmosferom ispunjenom slobodnim nabojima u svim smjerovima.

Superpozicijom odlaznog i suprotno putujućeg reflektiranog vertikalnog vala električnog skalarnog potencijala duž Z osi uspostavi se iznad mjesta udara munje u tlo, u golemoj rezonantnoj šupljini tlo – olujni oblaci ili viša atmosfera, "stupičast" longitudinalan stacionaran harmonijski val (Slika 3).



Slika 3 – Nastanak longitudinalnih putujućih skalarnih valova i "stupičastog" longitudinalnog stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala

<sup>1</sup> radio-signalni detektor

On bi, zbog vrlo malene gustoće uzdužne provodne struje  $\Gamma_{\kappa} = \kappa \cdot E$  i rekombinacije slobodnih naboja, dugotrajno živahno titrao uz neznatno prigušenje u golemom valjkastom rezonantnom prostoru promjera više desetaka pa sve do stotinjak kilometara, koji se proteže između tla i olujnih oblaka ili više atmosfere.

Pritom je, po Teslinom mišljenju, jedan čvor vala uvijek na tlu, na mjestu udara munje, a njegov drugi čvor, ili truh, je na mjestu refleksije odlaznog vala koje se nalazi vjerojatno negdje u olujnim oblacima. Tada se, naime, o višoj atmosferi, ozonskom sloju, ionosferi i njihovim električnim svojstvima još gotovo ništa nije znalo pa mu se na toj preliminarnoj pretpostavci ne može prigovoriti.

### 3. Teslini longitudinalni putujući i stacionarni valovi posve se razlikuju od hercijanskih valova

Teslini osebujni longitudinalni stacionarni valovi električnog skalarnog potencijala i vertikalno protivno putujući električni skalarni valovi koji ih tvore su se, zbog uzdužnog titranja unutar rezonantne šupljine, bitno razlikovali od tadašnje fizici jedino poznatih hercijanskih transverzalno-vektorskih TVEM valova s međusobno okomitim i sinkrono titrajućim vektorima jakosti polja.

Za razliku od hercijanskih valova, čije se jakosti EM polja brzo smanjuju udaljavanjem od emitera, lokalna amplituda potencijala Teslinih longitudinalnih stacionarnih valova povećavala se udaljavanjem od čvora na tlu duž vertikale (Z osi), što je Tesla lako i vjerodostojno utvrdio podizanjem/spuštanjem brončane kugle na vrhu izvlačivog antenskog stupa i mjerenjem njezinog napona prema tlu.

Radi toga je Tesla longitudinalne stacionarne valove, čije ekvipotencijalne plohe su horizontalne ravnine, odmah nazvao nehercijanskim valovima. Njihovo usputno slučajno otkriće veoma ga je ushitilo i držao ga je najvažnijim i najdalekosežnijim od svih svojih dotadašnjih otkrića. Ono ga je nadahnulo i snažno potaklo za daljnja istraživanja u tom smjeru, koja su kulminirala nekoliko godina kasnije izgradnjom golemog antenskog tornja s gljivastom kupolom na Long Islandu koji je, kao prvijenac od njih pet, trebao biti okosnica Teslinog svjetskog sustava bežičnog prijenosa signala i besplatne električne energije.

Zbog odbacivanja u znanstvenoj središnjici hipoteze o postojanju luminiferoznog (svjetlonosnog) etera – hipotetske nepokretne, savršeno fine, super-fluidne te fizikalno i kemijski nedetektibilne tvari koja ispunjava svemirski prostor i ne pruža nikakav otpor gibanju materije – kao nužnog preduvjeta za prijenos svih međudjelovanja na daljinu te uzdužno titranje električnog polja putujućih i stacionarnih TVEM valova u praznom prostoru – Teslini longitudinalni putujući i stacionarni valovi električnog skalarnog potencijala nisu se uklapali u prve dvije Heaviside-Hertzove vektorske jednadžbe teorijski već potpuno razrađene, eksperimentalno izvršno verificirane te opće prihvaćene klasične elektrodinamike – neupitan vrhunac i perlanicu tadašnje matematičke (teorijske) fizike.

Umjesto da se kritički preispita zašto se višekratnim mjerenjima nepobitno dokazani osebujni longitudinalni putujući i stacionarni skalarni valovi ne uklapaju u okvire klasične elektrodinamike u akademskim krugovima smatralo ih se, zbog uzdužnog titranja i ishitrene Tesline procjene da se šire nadsvjetlosnom brzinom, njegovom krivom interpretacijom te stalo ignorirati, gurati "*pod tepih*" ili u pseudoznanost, što nažalost traje sve do danas!

No, pravo je pitanje, je li i koliko je takav odbojan stav pripadnika znanstvene središnjice utemeljen? Argumentiran odgovor na njega nastoji se dati u ovom radu kritičkom analizom funkcioniranja Teslinog longitudinalnog stacionarnog harmonijskog vala električnog skalarnog potencijala baziranom na jednodimenzionalnom matematičkom modelu. Pritom se kao čvrsto polazište uzima:

- matematički izraz za jednodimenzionalan longitudinalan stacionaran harmonijski val električnog skalarnog potencijala s jednom čvorom na tlu te s njegovim drugim čvorom, ili truhom, u olujnim oblacima ili negdje u višoj atmosferi i
- sustav od četiri Heaviside-Hertzove vektorske parcijalne diferencijalne jednadžbe klasične elektrodinamike [3].

### 4. Jednodimenzionalan stacionaran harmonijski val

Jednodimenzionalan stacionaran (stojni) harmonijski val nastaje superpozicijom dva jednako polarizirana transverzalna ili longitudinalna putujuća vala jednake amplitude  $A$ , jednake kutne frekvencije  $\omega$  te suprotnoga smjera širenja duž iste valne zrake. Taj val nastaje samo u ili na ograničenom mediju kad se na istoj valnoj zraci susretnu i superponiraju odbijeni val i odlazni val koji stiže prema njemu.

Stacionaran neprigušen harmonijski ravan val koji poprečno ili uzdužno sinkrono titra na ograničenom rasponu valne zrake (Z osi) i ima čvor u ishodištu ( $z=0$ ) opisuje izraz

$$a(z, t) = 2 \cdot \underbrace{A \cdot \sin kz}_{a_m(z)} \cdot \cos \omega t = 2 \cdot a_m(z) \cdot \cos \omega t \quad , \quad k = \frac{\pi}{\lambda_s} \quad , \quad \omega = 2\pi \cdot f$$

U stacionarnom valu u nekim točkama na valnoj zruci medij, ili vektori polja, titraju maksimalnom amplitudom, a u nekima uopće ne titraju. Mjesta na valnoj zruci na kojima je lokalna amplituda jednaka nuli nazivaju se čvorovi vala, a mjesta na kojima je ona najveća nazivaju se trbusi vala.

Raspored lokalnih amplituda  $a_m(z) \leq A$  harmonijskog stacionarnog vala duž valne zrake omeđene čvorovima je sinusan pa su stoga one duž nje različite i ovisne o položaju na njoj koji određuje uzdužna varijabla  $z$ . Stacionaran harmonijski ravan val može biti skalarni ili vektorski i, za razliku od putujućeg ravnog vala, ne prenosi energiju. Valne fronte longitudinalnog i transverznog stacionarnog vala su usporedne ravnine okomite na valnu zraku.

## 5. Analiza funkcioniranja longitudinalnog stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala

Za analizu funkcioniranja Teslinog longitudinalnog stacionarnog harmonijskog ravnog vala električnog skalarnog potencijala uzima se potpun sustav jednačbi klasične elektrodinamike koji čine četiri Heaviside-Hertzove vektorske parcijalne diferencijalne jednačbe. Za EM polje u homogenom vodljivom prostoru s jednoliko raspršenim slobodnim nabojima one, prema [3], u operatorskom obliku zapisa, izgledaju ovako:

$$\begin{array}{ll} \underbrace{\text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}_{\text{Prva jednačba - načelo EM indukcije}} & \underbrace{\text{rot } \vec{H} = \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \kappa \cdot \vec{E} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{\kappa}{\varepsilon_0} \cdot \vec{D}}_{\text{Druga jednačba - Ampereov zakon protjecanja}} \\ \underbrace{\text{div } \vec{D} = \text{div}(\varepsilon_0 \cdot \vec{E}) = \rho}_{\text{Treća jednačba - izvornost } \vec{D} \text{ polja}} & \underbrace{\text{div } \vec{B} = \text{div}(\mu_0 \cdot \vec{H}) = 0}_{\text{Četvrta jednačba - bezizvornost } \vec{B} \text{ polja}} \end{array}$$

Prve dvije jednačbe su glavne, ograničenog su dosega i po geometrijskoj (topološkoj) naravi su valne i rotorske, što znači da su održive i funkcioniraju samo ako su dinamičko električno polje  $\vec{E}$ , gustoća struje pomaka  $\Gamma_D = \partial \vec{D} / \partial t$  i gustoća provodne struje  $\Gamma_\kappa = \kappa \cdot \vec{E}$  solenoidna (vrtložna i bezizvorna) ulančana polja koja imaju rotaciju. To podrazumijeva njihov tok po zatvorenoj strujnici (petlji). Magnetsko polje je, zbog svoje dipolne prirode, uvijek solenoidno pa ima tok po zatvorenoj petlji i rotaciju ( $\text{rot } \vec{H} \neq 0$ ).

Postavi li se prostorni Kartezijev ili cilindričan koordinatni sustav tako da mu je ishodište na površini tla, na mjestu udara munje, a njegova uzdužna Z os je usmjerena navise (Slika 3), može se longitudinalan stacionaran neprigušen harmonijski ravan val električnog skalarnog potencijala  $U(z, t)$  unutar rezonantne šupljine između tla i mjesta refleksije negdje u višoj atmosferi prikazati izrazom

$$U(z, t) = 2 \cdot \underbrace{U_M \cdot \sin k_0 z}_{=U_m(z)} \cdot \cos \omega t \quad , \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\pi}{\lambda_s} = \frac{2\pi \cdot f}{c_0} = \frac{\omega}{c_0}$$

Pripadan stacionaran val uzdužnog električnog polja  $\vec{E}(z, t)$  na promatranom mjestu  $z$ , prema [3], je negativan gradijent stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala  $U(z, t)$  koji superpozicijom grade vertikalno zatitrani slobodni električni naboji unutar rezonantne šupljine. To električno polje je izvorno i zrakasto, dakle nesoleidno, jer počinje i završava na slobodnim nabojima.

Za svaki ravan val čija se valna zraka u Kartezijevim i cilindričnim koordinatama podudara s uzdužnom Z osi Hamiltonov *nabla* operator je jednočlan i glasi  $\nabla = \vec{k} \cdot \partial / \partial z$  pa vrijedi

$$\vec{E}(z, t) = -\vec{\nabla} U(z, t) = -\vec{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z} U(z, t) = E_z(z, t) \cdot \vec{k} = -2 \cdot \underbrace{k_0 \cdot U_M}_{=E_M} \cdot \cos k_0 z \cdot \cos \omega t \cdot \vec{k}$$

Rotaciju električnog polja  $\vec{E}(z, t)$  stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala  $U(z, t)$  i divergenciju pripadnog vala vektora električnog pomaka  $\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$  određuju operatorski izrazi:

$$\text{rot } \vec{E}(z,t) = \vec{\nabla} \times \vec{E}(z,t) \quad \text{div } \vec{D}(z,t) = \vec{\nabla} \cdot \vec{D}(z,t)$$

Njihovim razvojem dobivaju se tražena rješenja na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}(z,t) &= \vec{\nabla} \times \vec{E}(z,t) = \vec{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \times [E_z(z,t) \cdot \vec{k}] = \frac{\partial E_z}{\partial z} \cdot \underbrace{\vec{k} \times \vec{k}}_{=0} = 0 \\ \text{div } \vec{D}(z,t) &= \vec{\nabla} \cdot \vec{D}(z,t) = \vec{\nabla} \cdot [\varepsilon_0 \cdot \vec{E}(z,t)] = \vec{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot [\varepsilon_0 \cdot E_z(z,t) \cdot \vec{k}] = \\ &= \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial E_z}{\partial z} \cdot \underbrace{\vec{k} \cdot \vec{k}}_{=1} = \rho(z,t) = 2 \cdot \underbrace{\varepsilon_0 \cdot k_0^2 \cdot U_M}_{=\rho_M} \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t \neq 0 \\ \rho(z,t) &= 2 \cdot \rho_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t = 2 \cdot \rho_m(z) \cdot \cos \omega t \neq 0 \end{aligned}$$

Za razliku od poprečnog bezizvornog (solenoidnog) dvodimenzionalno titrajućeg polja hercijanskog vala uzdužno titrajuće zrakasto električno polje  $\vec{E}(z,t)$  Teslinog stacionarnog harmonijskog vala proizlazi iz longitudinalnog vala električnog skalarnog potencijala  $U(z,t)$  slobodnih naboja raspršenih u atmosferi.

Stoga je ono izvorno i bezvrtložno (nesoleidno) polje čije silnice su pramen paralelnih dužina unutar rezonantne šupljine omeđene točkom refleksije vala na tlu i točkom refleksije na pobliže teško odredivom mjestu u višoj atmosferi. Električnom polju  $\vec{E}(z,t)$  pridružen stacionaran harmonijski vektorski val gustoće uzdužne struje pomaka  $\vec{\Gamma}_D(z,t)$  određuje izraz

$$\vec{\Gamma}_D(z,t) = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(z,t) = \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon_0 \cdot E_z(z,t) \cdot \vec{k}] = 2 \cdot \underbrace{\varepsilon_0 \cdot k_0 \cdot \omega \cdot U_M}_{=\Gamma_M} \cdot \cos k_0 z \cdot \sin \omega t \cdot \vec{k}$$

Rotacija i divergencija zrakastog polja uzdužne gustoće  $\vec{\Gamma}_D$  struje pomaka i, u odnosu na nju, malenu uzdužnu gustoću  $\vec{\Gamma}_\kappa$  provodne struje jesu:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{\Gamma}_D &= \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{D}) = \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\underbrace{\vec{\nabla} \times \vec{E}}_{=0}) = \vec{0} \quad \text{rot } \vec{\Gamma}_\kappa = \vec{\nabla} \times (\kappa \cdot \vec{E}) = \vec{0} \\ \text{div } \vec{\Gamma}_D &= \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\underbrace{\vec{\nabla} \cdot \vec{D}}_{=\rho(z,t)}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0 \quad \text{div } \vec{\Gamma}_\kappa = \vec{\nabla} \cdot (\kappa \cdot \vec{E}) = \frac{\kappa}{\varepsilon_0} \cdot \rho \neq 0 \end{aligned}$$

## 6. Što o pratećem magnetskom polju Teslinog stacionarnog vala proizlazi iz prvih dviju jednadžbi elektrodinamike?

Uvrštenjem prethodnog rješenja  $\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$  u prvu jednadžbu elektrodinamike ona se na lijevoj strani urušava (gasi) te izgleda ovako:

$$\text{rot } \vec{E} = \vec{0} = -\mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0}$$

Integracijom njezine desne nulte strane po vremenu

$$\int \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot dt = \int \vec{0} \cdot dt = \vec{H}_0$$

dobiva se, kao vektorska konstanta integracije, hipotetsko vremenski nepromjenljivo (statičko) te proizvoljno usmjereno magnetsko polje  $\vec{H}_0$  koje za longitudinalan stacionaran val električnog skalarnog potencijala  $U(z,t)$  nije zanimljivo jer nema elektromagnetski induksijski učinak.

To upućuje na zaključak da u valnoj fronti longitudinalnog stacionarnog vala nema pratećeg poprečnog stacionarnog vala dinamičkog magnetskog polja ulančanog s njegovim uzdužnim (izvornim i zrakastim) električnim poljem. Da se to dodatno provjeri valja pogledati što o tom kaže druga jednadžba.

Pretpostavi li se u tu svrhu da u valnoj fronti stacionarnog vala električnog skalarnog potencijala ipak postoji prateće magnetsko polje ono: zbog zakona elektromagnetske indukcije, svoje dipolne prirode i solenoidnosti ne može biti ni titrati uzdužno ( $\text{rot } \vec{H}_z = \vec{0}$ ) već samo poprečno na vektor  $\vec{E}$  električnog polja jer



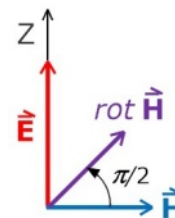
je jedino tada zadovoljen uvjet njegove solenoidnosti  $\text{rot } \vec{H} \neq \vec{0}$ . Stoga ono, ako postoji, može imati samo radijalnu komponentu  $H_\rho$  pa u cilindričnim koordinatama vrijedi  $\vec{H} = H_\rho(z, t) \cdot \vec{e}_\rho$ .

Za pretpostavljeno prateće poprečno (solenoidno) dinamičko magnetsko polje stacionarnog vala druga jednačba elektrodinamike glasi

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \kappa \cdot \vec{E} = \vec{\Gamma}_D + \vec{\Gamma}_\kappa = [\Gamma_D(z, t) + \Gamma_\kappa(z, t)] \cdot \vec{k}$$

Rotacija pretpostavljenog radijalnog  $\vec{H}$  polja određena je izrazom

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H} &= \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{\nabla} \times (H_\rho \cdot \vec{e}_\rho) = \left( \vec{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \right) \times (H_\rho \cdot \vec{e}_\rho) = \frac{\partial H_\rho}{\partial z} \cdot \underbrace{\vec{k} \times \vec{e}_\rho}_{=\vec{e}_\varphi} = \\ &= \frac{\partial H_\rho}{\partial z} \cdot \vec{e}_\varphi \neq [\Gamma_D(z, t) + \Gamma_\kappa(z, t)] \cdot \vec{k} \rightarrow \text{nejednakost!} \end{aligned}$$



Ona je poprečna, zakrenuta je prema pretpostavljenom vektoru  $\vec{H}$  za  $\pi/2$  i nekompatibilna je s vektorskim zbrojem uzdužnih gustoća struje pomaka  $\vec{\Gamma}_D$  i provodne struje  $\vec{\Gamma}_\kappa$  na desnoj strani jednačbe.

Stoga je, po pravilu određivanja rotacije, očito da ne postoji poprečno magnetsko polje longitudinalnog skalarnog vala čija rotacija je uzdužna. Uvrštenjem uzdužnog električnog polja u drugu jednačbu ona degenerira u vektorsku nejednakost pa je za Teslin longitudinalan stacionaran val i vertikalne suprotno putujuće skalarne valove koji ga tvore, zbog linearne nezavisnosti jediničnih vektora  $\vec{e}_\varphi$  i  $\vec{k}$  cilindričnih koordinata, ona neodrživa i suvišna.

Time je potvrđen zaključak da taj osebujan električni skalarni val nema prateće dinamičko magnetsko polje pa stoga on ne podliježe Lenzovom zakonu, što je podudarno s [5]. Zato se širenje longitudinalnih električnih skalarnih valova ne može zapriječiti Faradayevim kavezom.

## 7. Za longitudinalan stacionaran val suviše su prve dvije i četvrta jednačba elektrodinamike

Uzdužno električno polje  $\vec{E}(z, t)$  longitudinalnog stacionarnog vala  $U(z, t)$  je potencijalno pa pripadan stacionaran val nejednolike gustoće  $\vec{\Gamma}_D(z, t)$  struje pomaka i gustoće  $\vec{\Gamma}_\kappa = \kappa \cdot \vec{E}$  provodne struje duž segmenta valne zrake omeđenog točkom refleksije na tlu i točkom refleksije u višoj atmosferi posvuda imaju divergenciju  $\text{div } \vec{\Gamma}_D = \partial \rho / \partial t \neq 0$  i  $\text{div } \vec{\Gamma}_\kappa = \kappa \cdot \rho / \epsilon_0 \neq 0$ , a njihove rotacije  $\text{rot } \vec{\Gamma}_D$  i  $\text{rot } \vec{\Gamma}_\kappa$  su nulvektori. Stoga obje:

- zbog izvornosti ne udovoljavaju jednačbi kontinuiteta i
- ne teku zatvorenom strujnicom, već dužinom, pa nisu solenoidne!

One su, kao izvorne i zrakaste, magnetski neproduktivne pa ne grade oko sebe poprečan stacionaran val pratećeg dinamičkog magnetskog polje koje bi u valnoj fronti bilo ulančano s uzdužnim električnim poljem stacionarnog skalarnog vala.

Zbog izostanka magnetskog polja prve dvije jednačbe elektrodinamike su za longitudinalne putujuće i stacionaran val električnog skalarnog potencijala geometrijski (topološki) neodržive i suviše. Također je suvišna i četvrta jednačba ( $\text{div } \vec{B} = 0$ ) pa za opisivanje uzdužnog električnog polja tih valova preostaje, kao nužna i dovoljna, samo treća (Poissonova) nehomogena jednačba

$$\boxed{\text{div } \vec{D} = \rho(z, t)}$$

Budući da je na promatranom mjestu  $z$  valne zrake u trenutku  $t$  uzdužni val vektora jakosti električnog polja  $\vec{E}(z, t)$ , prema [3], jednak negativnom gradijentu skalarnog potencijala  $U(z, t)$  prethodni izraz može se napisati u obliku

$$\text{div } \vec{D} = \text{div}(\epsilon_0 \cdot \vec{E}) = \text{div}(-\epsilon_0 \cdot \text{grad } U) = -\epsilon_0 \cdot \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} U) = -\epsilon_0 \cdot \Delta U = \rho(z, t)$$

Time je dobivena skalarna parcijalna diferencijalna jednačba koja povezuje neprigušen longitudinalan stacionaran val električnog skalarnog potencijala  $U(z, t)$  i pripadan stacionaran skalarni val



vertikalne prostorne gustoće  $\rho(z,t)$  slobodnih naboja raspršenih u atmosferi unutar rezonantne šupljine. U operatorskom obliku zapisa ona izgleda ovako:

$$\Delta U(z,t) = -\frac{\rho(z,t)}{\epsilon_0} \quad \text{ili} \quad \Delta U(z,t) + \frac{\rho(z,t)}{\epsilon_0} = 0$$

Budući da je Laplaceov skalarni *delta* operator  $\Delta = \nabla \cdot \nabla$  za ravan val, čija se valna zraka u Kartezijevim ili cilindričnim koordinatama podudara s uzdužnom Z osi, jednočlan te sadrži samo operator dvostrukog parcijalnog diferenciranja po varijabli  $z$ , može se prethodna jednačba za Teslin longitudinalan stacionaran neprigušen ravan val električnog skalarnog potencijala  $U(z,t)$  iskazati u lakše razumljivom diferencijalnom obliku zapisa:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} U(z,t) = -\frac{\rho(z,t)}{\epsilon_0} \quad \text{ili} \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} U(z,t) + \frac{\rho(z,t)}{\epsilon_0} = 0$$

## 8. Prigušenje titranja Teslinog longitudinalnog stacionarnog vala

Primijeni li se na drugu jednačbu operator divergencije dobiva se:

$$\operatorname{div} \left( \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{\kappa}{\epsilon_0} \cdot \vec{D} \right) \rightarrow \underbrace{\operatorname{div}(\operatorname{rot} \vec{H})}_{=0} = \frac{\partial}{\partial t} \cdot \underbrace{\operatorname{div} \vec{D}}_{=\rho} + \frac{\kappa}{\epsilon_0} \cdot \underbrace{\operatorname{div} \vec{D}}_{=\rho}$$

što daje homogenu linearnu diferencijalnu jednačbu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\kappa}{\epsilon_0} \cdot \rho = 0$$

Ona opisuje vrlo sporo smanjenje udarom munje drastično poremećene lokalne amplitude gustoće slobodnih naboja  $\rho_m(z)$  i lokalne amplitude pripadnog skalarnog potencijala  $U_m(z)$  koji oni grade zbog malene gustoće uzdužne provodne struje  $\Gamma_\kappa = \kappa \cdot E \ll \Gamma_D$  koja ima tendenciju ujednačenja vertikalne gustoće slobodnih naboja u rezonantnoj šupljini duž valne zrake. Njezino rješenje je:

$$\rho_m(z) = \rho_M \cdot \sin k_0 z \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \rho_0 \quad \text{odnosno} \quad U_m(z) = U_M \cdot \sin k_0 z \cdot e^{-\frac{t}{T}} + u_0$$

Vremenska konstanta relaksacije vertikalne gustoće zatitranih slobodnih naboja  $T = \epsilon_0 / \kappa$  je, okvirno uzevši, desetak minuta, što se može zaključiti na temelju Tesline konstatacije da su longitudinalni stacionarni valovi električnog skalarnog potencijala uobičajeno trajali desecima minuta, a neki i dulje od sata [2].

## 9. Longitudinalan stacionaran val električnog skalarnog potencijala je složena fizikalna pojava

Na temelju provedene analize izraza za:

- longitudinalan stacionaran neprigušen harmonijski val električnog skalarnog potencijala  

$$U(z,t) = 2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t$$
- stacionaran vektorski val njegovog uzdužno titrajućeg električnog polja  

$$\vec{E}(z,t) = -2 \cdot k_0 \cdot U_M \cdot \cos k_0 z \cdot \cos \omega t \cdot \vec{k} = -2 \cdot E_M \cdot \cos k_0 z \cdot \cos \omega t \cdot \vec{k}$$
- te stacionaran skalarni val vertikalne volumnne gustoće slobodnih naboja  

$$\rho(z,t) = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot k_0^2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t = 2 \cdot \rho_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t$$

je očito da stacionaran val električnog skalarnog potencijala utjelovljuje šest uzajamno povezanih longitudinalnih stacionarnih valova. To su:

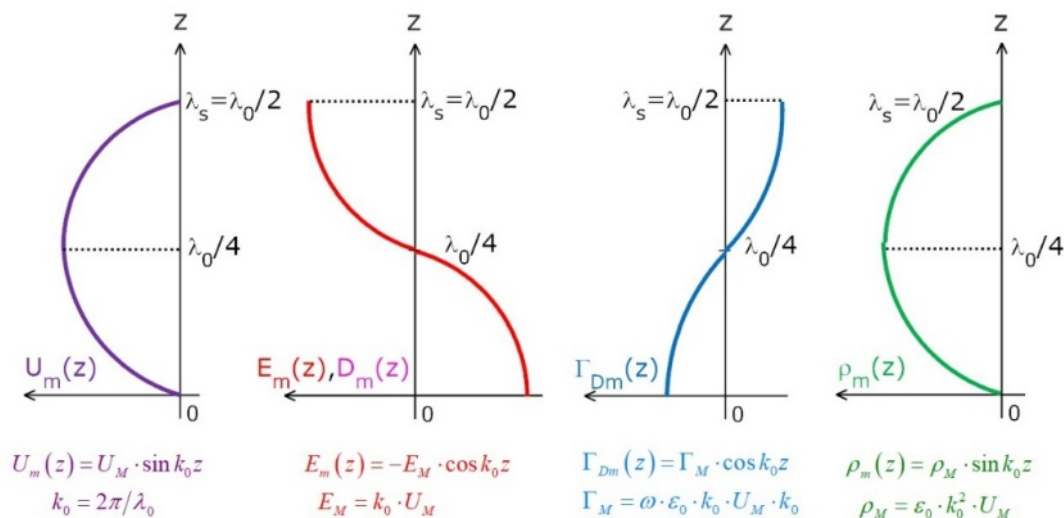
- dva temeljna prostorno i vremenski istofazna neprigušena skalarna vala ( $U$  i  $\rho$ )

- vektorski val jakosti električnog polja  $\mathbf{E}$  i pridruženi val vektora pomaka  $\mathbf{D}$  te
- vektorski val gustoće struje pomaka  $\mathbf{\Gamma}_D = \partial \mathbf{D} / \partial t$  te, u odnosu na nju, vrlo malenu gustoću provodne struje  $\mathbf{\Gamma}_K = \kappa \cdot \mathbf{E} \ll \mathbf{\Gamma}_D$

Razdioba lokalnih amplituda duž valne zrake za longitudinalne stacionarne valove:

- električnog skalarnog potencijala  $U_m(z)$ ,
- jakosti uzdužnog električnog polja  $E_m(z)$  i vektora pomaka  $\mathbf{D}_m(z)$ ,
- uzdužne gustoće struje pomaka  $\mathbf{\Gamma}_{Dm}$  te
- vertikalne prostorne gustoće slobodnih naboja  $\rho_m(z)$

u rezonantnoj šupljini između čvora na tlu i točke refleksije (čvora ili trbuha vala) u višoj atmosferi prikazana je dijagramima na Slici 4.



Slika 4 – Razdioba lokalnih amplituda  $U_m(z)$ ,  $E_m(z)$ ,  $\Gamma_{Dm}(z)$  i  $\rho_m(z)$  duž valne zrake u Teslinom longitudinalnom stacionarnom valu

## 10. Valne jednadžbe skalarnog potencijala, električnog polja i gustoće slobodnih naboja longitudinalnog stacionarnog vala

D'Alembertova parcijalna diferencijalna valna jednadžba [3] za longitudinalan stacionaran neprigušen harmonijski val električnog skalarnog potencijala  $U(z,t)$  može se dobiti njegovim dvostrukim parcijalnim diferenciranjem po varijablama  $z$  i  $t$  te dijeljenjem tih derivacija:

$$U(z,t) = 2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t \quad - \quad \text{val električnog skalarnog potencijala}$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 2 \cdot k_0 \cdot U_M \cdot \cos k_0 z \cdot \cos \omega t \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -2 \cdot k_0^2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -2 \cdot \omega \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \sin \omega t \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -2 \cdot \omega^2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \bigg/ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{-2 \cdot k_0^2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t}{-2 \cdot \omega^2 \cdot U_M \cdot \sin k_0 z \cdot \cos \omega t} = \left( \frac{k_0}{\omega} \right)^2 = \left( \frac{\omega}{c_0} \cdot \frac{1}{\omega} \right)^2 = \frac{1}{c_0^2} = \epsilon_0 \cdot \mu_0$$

pa valna jednadžba skalarnog potencijala  $U(z,t)$  unutar rezonantne šupljine glasi:

$$\frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \square U = 0 \quad , \quad \square = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \rightarrow \quad \text{valni operator}$$

Na istovjetan način dobivaju se valne jednadžbe za stacionaran val uzdužnog električnog polja (vektor  $\mathbf{E}$  i pridruženi vektor  $\mathbf{D}$ ) te stacionaran skalarni val vertikalne prostorne gustoće slobodnih naboja  $\rho$  duž valne zrake unutar rezonantne šupljine tlo – viša atmosfera. One glase:

$$\square \vec{E} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \vec{0} \quad \square \vec{D} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial z^2} = \vec{0} \quad \square \rho = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = 0$$

Iz njih je očito da se longitudinalni putujući valovi električnog skalarnog potencijala rasprostiru kroz atmosferu faznom brzinom svjetlosti kao i hercijanski TVEM valovi pa su bez ikakve osnove spekulacije da se putujući električni skalarni valovi, zbog uzdužnog titranja, šire nadsvjetlosnom brzinom!

## 11. Usporedba značajki Teslinog stacionarnog i hercijanskog putujućeg ravnog vala

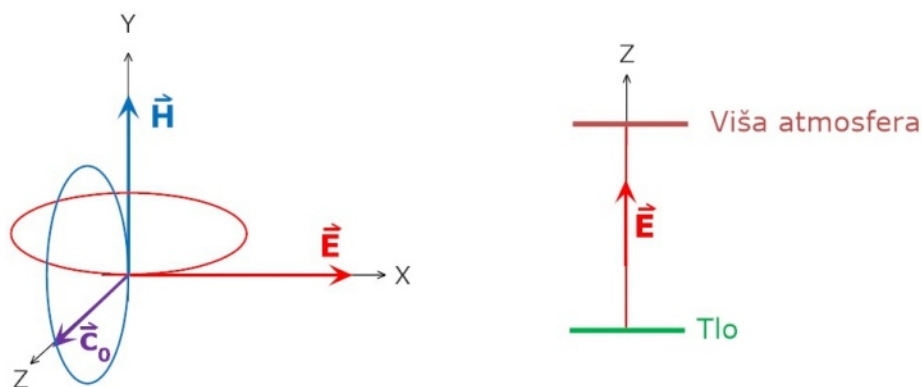
Na temelju provedene matematičke analize funkcioniranja Teslinog longitudinalnog stacionarnog harmonijskog ravnog vala električnog skalarnog potencijala može se načiniti usporedan tablični pregled njegovih značajki i srodnih značajki ravnog putujućeg hercijanskog TVEM vala.

Tablica 1 – Usporedba značajki Teslinog nehercijanskog i hercijanskog TVEM vala

| Vrst vala              | Teslin nehercijanski val                           | Hercijanski TVEM val                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| EM polje               | Ima samo uzdužno <b>E</b> polje                    | Ima poprečno <b>E</b> i <b>H</b> polje                                              |
| Titranje vektora polja | Uzdužno jednodimenzionalno                         | Poprečno dvodimenzionalno                                                           |
| Divergencija           | $\text{div } \mathbf{E} = -\rho/\epsilon_0 \neq 0$ | $\text{div } \mathbf{E} = 0$ , $\text{div } \mathbf{H} = 0$                         |
| Rotacija               | $\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}$              | $\text{rot } \mathbf{E} \neq \mathbf{0}$ , $\text{rot } \mathbf{H} \neq \mathbf{0}$ |
| Slobodni naboji        | Neophodni                                          | Nepotrebni                                                                          |
| Skalarni potencijal    | Ima <b>E</b> polje                                 | Nema nijedno polje                                                                  |
| Vektorski potencijal   | Nema                                               | Imaju <b>E</b> i <b>H</b> polje                                                     |
| Poyntigov vektor       | Nema                                               | Ima $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$                                     |
| Širenje                | Prostorno ograničena pojava                        | Neograničeno širenje                                                                |

Iz tablične usporedbe značajki tih dvaju valova je očito da se Teslin longitudinalan stacionaran val električnog skalarnog potencijala, kao i pripadni nasuprotno vertikalno putujući skalarni valovi koji ga tvore, po načinu funkcioniranja i pojavi samo u ograničenom prostoru unutar goleme rezonantne šupljine između tla i viših slojeva atmosfere ispunjene slobodnim nabojima, posve razlikuju od putujućeg hercijanskog TVEM vala koji se samostalno neograničeno širi praznim prostorom ( $\epsilon_r = 1$ ) ili medijem ( $\epsilon_r > 1$ ) pripadnom faznom brzinom svjetlosti ( $c_0$  ili  $c_0/\sqrt{\epsilon_r}$ ).

Vektori jakosti polja i vrtožne silnice hercijanskog TVEM vala te vektor jakosti uzdužnog zrakastog električnog polja i pripadna ravna silnica električnog polja Teslinog longitudinalnog stacionarnog vala te protivno putujućih valova električnog skalarnog potencijala koji ga tvore prikazani su na slici 5:



Slika 5 – Vektori polja i silnice hercijanskog TVEM vala i Teslinog skalarnog vala

## Matematički dodatak

Tablica 2 — Vektorska polja i njihove značajke

| Vektorsko polje                                  | Rotacija i divergencija vektorskog polja                                                                                                                                         | Oblik silnica                          |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Potencijalno ili bezvrtložno                     | $\text{rot } \mathbf{V} = \nabla \times \mathbf{V} = \mathbf{0}$ – u svim točkama<br>$\text{div } \mathbf{V} = \nabla \cdot \mathbf{V} \neq 0$ – barem u nekim točkama           | Zrakaste linije                        |
| Solenoidno ili bezizvorno                        | $\text{rot } \mathbf{V} = \nabla \times \mathbf{V} \neq \mathbf{0}$ – barem u nekim točkama<br>$\text{div } \mathbf{V} = \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ – u svim točkama           | Zatvorene konture                      |
| Laplaceovo<br>(bezvrtložno i bezizvorno)         | $\text{rot } \mathbf{V} = \nabla \times \mathbf{V} = \mathbf{0}$ – u svim točkama<br>$\text{div } \mathbf{V} = \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ – u svim točkama                     | Zrakaste linije                        |
| Složeno ili općeg oblika<br>(vrtložno i izvorno) | $\text{rot } \mathbf{V} = \nabla \times \mathbf{V} \neq \mathbf{0}$ – barem u nekim točkama<br>$\text{div } \mathbf{V} = \nabla \cdot \mathbf{V} \neq 0$ – barem u nekim točkama | Zatvorene konture i<br>zrakaste linije |

## Zaključak

Na temelju Teslinog zapisa o otkriću longitudinalnog stacionarnog harmonijskog neprigušenog vala električnog skalarnog potencijala i načinjene matematičke analize njegovog funkcioniranja može se ustvrditi sljedeće:

- Teslinim mjerenjima u Coloradu Springsu ti valovi su vjerodostojno dokazana fizikalna pojava. U pedantno vođenom dnevniku mjerenja on je zapisao njihovo usputno slučajno otkriće i sažeto je objasnio njihov nastanak, ali se nije upuštao u složenu matematičku analizu njihovog funkcioniranja jer mu oni tada nisu bili istraživački prioritet.
- Longitudinalni stacionarni skalarni valovi pojave se uslijed udara munje iz olujnih oblaka u tlo samo u ograničenom prostoru unutar ogromne valjkaste rezonantne šupljine ispunjene raspršenim slobodnim nabojima (ionima i elektronima). Jedan čvor im je uvijek na tlu, na mjestu udara munje, a drugi ili trbuh im je na poblježe teško određivom mjestu refleksije negdje u olujnim oblacima, višoj atmosferi ili čak u ionosferi.
- Uzdužno električno polje putujućih i stacionarnih skalarnih valova je potencijalno (izvorno i zrakasto), a njegova nejednolika uzdužna gustoća struje pomaka i malena gustoća provodne struje koje ne teku po zatvorenoj petlji su magnetski neproduktivne i ne grade u valnoj fronti poprečno magnetsko polje ulančano s uzdužnim električnim poljem. To proizlazi iz urušavanja prvih dviju vektorskih jednadžbi elektrodinamike kad se u njih uvrsti uzdužni val električnog polja.
- Zbog izostanka pratećeg dinamičkog magnetskog polja za matematičku interpretaciju Teslinih longitudinalnih putujućih i stacionarnih valova električnog skalarnog potencijala suviše su prve dvije i četvrta jednadžba elektrodinamike pa je za njihovo matematičko opisivanje i analizu dostatna samo treća (Poissonova) nehomogena skalarna jednadžba.
- Budući da nehercijanski električni skalarni valovi u valnoj fronti nemaju prateće dinamičko magnetsko polje oni ne podliježu Lenzovom zakonu pa se njihovo širenje ne može zapriječiti Faradayevim kavezom. Zato su oni, za razliku od hercijanskih TVEM valova, vrlo prodorni.

## Literatura

- [1] Jovan Cvetić, *Tesla's magnifying transmitter principles of working*, prezentacija, School of Electrical Engineering, University of Belgrade, datum izrade nepoznat
- [2] Nikola Tesla, *Colorado Springs Notes 1899-1900*, Muzej Nikole Tesle & Nolit, Beograd, 1978.
- [3] Javorski – Detlaf, *Priručnik iz fizike*, Golden marketing & Tehnička knjiga, Zagreb, 2008.
- [4] Bronštejn – Semendjajev, *Matematički priručnik*, Golden marketing & Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [5] Donald Reed, *Unravelling the potentials puzzle and corresponding case for the scalar longitudinal electrodynamic wave*, IOP Conf. Series: Journal of Physics, 2019.



*Darko Žubrinić*

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Sveučilišta u Zagrebu

darko.zubrinic@fer.hr

## **PREDAVANJE NIKOLE TESLE PRED PET TISUĆA LJUDI 1893. U ST. LOUISU**

**Sažetak:** Nikola Tesla je 1. ožujka 1893. održao predavanje *On light and other high-frequency phenomena* (O svjetlosti i drugim visokofrekvencijskim pojavama) u gradu St. Louisu u SAD-u (država Missouri) koje je izazvalo nezapamćen interes. Predavanju održanom u koncertnoj dvorani nazočilo je 5000 ljudi (od njih su 3500 imali sjedeća mjesta, a 1500 ih je stajalo), pri čemu je više od 2000 ljudi je ostalo bez karata, koje su se dijelile besplatno. Tesla je među inim tada po prvi puta javno prikazao princip rada radio-aparata. U članku je prikazano kako je Teslino predavanje popratilo američki tisak. Također je naveden i izvorni tekst Nikole Tesle u pohvalu ljudskom oku i vidu, vjerojatno jedan od najljepših ikada napisan.

**Ključne riječi:** Nikola Tesla, predavanje u St. Louisu, o svjetlosti, 1893.

### **Uvod**

Nikola Tesla je u rodnoj Hrvatskoj proveo prvih osamnaest godina svojeg života, tj. blizu jedne petina života. Posljednje dvije trećine života proveo je u SAD-u, uz dva kraća prekida posjetivši Europu. Što se publiciteta tiče, za njega je prijelomna godina bila 1893., u kojoj je postao poznat širom svijeta, osobito radi njegova sudjelovanja s Georgeom Westinghouseom na Svjetskoj Kolumbovoj izložbi (World's Columbia Exhibition) u Chicagu.

Izložbu u Chicagu je 1. svibnja 1893. svečano otvorio tadašnji predsjednik SAD-a Grover Cleveland (1837.-1908.), pritiskom na pozlaćeni gumb od slonovače koji je pokrenuo moćne Tesline turbine na izmjeničnu struju od 2000 konjskih snaga svaka, nakon čega se upalilo 160 tisuća električnih žarulja. Dvanaest dinamo aparata težine 75 tona svaki, davalo je tri puta više električne energije nego cijeli grad Chicago. Međutim, manje je poznato da je dva mjeseca prije početka spomenute izložbe u Chicagu, Tesla održao javno predavanje u jednoj golemoj koncertnoj dvorani u St. Louisu, koje je odjeknulo širom SAD-a, pa i u svijetu.

Dne 1. ožujka 1893. Nikola Tesla je imao čast održati predavanje u St. Louisu u jednoj koncertnoj dvorani koja je primila više od pet tisuća ljudi. Karte su se dijelile besplatno, a još nekoliko tisuća zainteresiranih nije uspjelo ući. O tom predavanju je idućeg dana izvijestio tadašnji tisak u časopisu "Iron County Register", u vrlo zanimljivom članku pod naslovom "Teslini trijumfi" (Tesla's Triumphs), a s podnaslovom "Večer s crnogorskim električarskim čarobnjakom" (An Evening with the Montenegrin Electrical Wizard). Kao što vidimo, u članku je u spomenutom podnaslovu, kao i na još jednom mjestu u tekstu, Tesla označen Crnogorcem. Pretpostavljamo da je ta pogreška odraz činjenice što je Tesla napamet znao stihove "Gorskog vijenca" Petra Petrovića Njegoša, pjesnika i državnika, a koje je, srećući ljude iz našeg dijela Europe, vjerojatno pred njima i recitirao.

---

## 1. Teslino predavanje u koncertnoj dvorani u St. Louisu

Prema opisu iz knjige [1, str. 367], Teslino predavanje u St. Louisu (država Missouri) je 1893. organizirala udruga *National Electric Light Association* (Nacionalna udruga za električnu rasvjetu) samo za užu krug stručnjaka, ali je zbog nezapamćenog zanimanja stanovnika grada na koncu osigurana velika koncertna dvorana u koju se smjestilo preko 5000 ljudi. Teslino predavanje u Philadelphiji (i ponovljeno u St. Louisu) u spomenutoj knjizi obasiže skoro 80 str. Prvih osam stranica predstavlja divnu Teslinu laudu značaju ljudskog oka<sup>1</sup> u spoznavanju, koju prilažemo niže u ovom članku.

U svojem uvodnom tekstu, dr. Ken Mondschein na str. 367 spomenute knjige piše da je Nikola Tesla nakon svojeg povratka iz Europe u SAD na jesen 1892. održao veljače 1893. svoje treće predavanje u Franklinovom institutu u Philadelphiji. Na molbu Jamesa I. Ayera, predsjednika Nacionalne udruge za električnu rasvjetu (National Electric Light Association), Tesla je sljedeći tjedan

<sup>1</sup> Opis se nalazi na str. 542-550 knjige [1].

ponovio to predavanje u St. Louisu. Predavanje je bilo predviđeno samo za članove spomenute udruge, ali je na opetovane zamolbe građana St. Louisa osigurana dvorana za preko 5000 osoba. Teslino predavanje je u nekim svojim dijelovima bilo popularne naravi u odnosu na prethodne nastupe. Kao što spominje dr. Mondschein, Tesla je iskoristio prigodu da pokaže mnoge svoje sasvim nove eksperimente, čime je pomaknuo granice poznavanja njegovih otkrića u javnosti više nego ikada prije.

Spomenimo da je u St. Louisu (Missouri) djelovala hrvatska iseljenička zajednica. Godine 1910. ona broji 5000 Hrvata; vidi članak [Ante Čuvalo]. Vjerujemo da je među slušačima Teslina predavanja bilo i naših ljudi.



Izložbena zgrada u St. Louisu (danas Javna knjižnica – Public Library), s velikom koncertnom dvoranom (Grand Music Hall), gdje je 1. ožujka 1893. Nikola Tesla održao svoje predavanje pred 5000 slušača.

Predavanje u St. Louisu održano je u prepunoj koncertnoj dvorani (Grand Music Hall) koja se nalazila u velikoj Izložbenoj zgradi (Exposition Building, gdje se danas nalazi Javna knjižnica - Public Library). U opticaj je pušteno pet tisuća karata koje su se dijelile besplatno. Posebno istaknutim građanima St. Louisa upućeni su zasebni pozivi, pa je susret bio grandiozan i vrlo reprezentativan. Tom su predavanju nazočili vodeći engleski znanstvenici Lord Kelvin<sup>II</sup>, Lord Rayleigh<sup>III</sup>, Silvanus P. Thompson<sup>IV</sup>, zatim Arnold von Siemens<sup>V</sup>,

<sup>II</sup> Lord Kelvin, tj. William Thomson, predsjednik Royal Society, koji je postao lordom prethodne 1892. godine kao prvi britanski znanstvenik

<sup>III</sup> Lord Rayleigh, tj. John William Strutt, član Royal Society i dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1904.

<sup>IV</sup> S. P. Thompson, član Royal Society.

<sup>V</sup> A. von Siemens, najstariji sin Wenera von Siemens, utemeljitelj koncerna Siemens.

kao i princ od Walesa (Albert Edward) s obitelji. Dvorana je imala 3500 sjedećih mjesta, još 1500 zainteresiranih je dobilo mjesta za stajanje, a više od dvije tisuće ljudi ostalo je na njihovu veliku žalost bez karata. Navala je bila tolika da se za jedno uhvaćeno mjesto plaćalo 3-5 dolara, iako je ulaz bio besplatan.<sup>VI</sup>

Teslini uređaji bili su stavljeni na masivan drveni stol dugačak blizu sedam metara koji je bio dopremljen na podij koncertne dvorane. S lijeve strane stola bio je postavljen zgodan kružić, lijepo osvijetljen, s riječima “St. Louis Ex., 1893.” oko njegova ruba. Značaj tog predavanja je među inim bio u tome što je tom prigodom Tesla po prvi puta demonstrirao princip rada radio-aparata. Šesnaest godine kasnije, 1909., Marconiju je (koji je također bio na tom Teslinom predavanju St. Louisu) nezasluženo dodijeljena Nobelova nagrada za fiziku 1909. godine za “njegovo otkriće” radio-aparata.

U oko 8:30 prijepodne je između dvadeset i trideset vodećih stručnjaka za elektricitet ušlo u dvoranu i zauzelo mjesta u prvim redovima, na solidnoj udaljenosti od eksperimentalnog stola. Među njima je bio i g. James I. Ayer, predsjednik *National Electric Light Association*, koji je na početku predstavio predavača, poštujući zanimljivu želju Nikole Tesle da ne bude tituliran niti kao “mister” niti kao “profesor”. U dvorani je bilo oko šest stotina članova spomenute udruge.

Mladi predavač, koji je 1893. imao 37 godina, zahvalio se na ugodnom prijemu i odmah započeo sa svojim predavanjem. Za razliku od mnogih znanstvenika, Nikola Tesla je tijekom cijelog svojeg izlaganja nastojao biti razumljiv svojim slušateljima.

U početnom dijelu predavanja, posvećenom pitanju fosforescentne svjetlosti, mladi je znanstvenik (u članku se na ovome mjestu navodi - “mladi Crnogorac”) opsežno govorio o vezi između prirode i elektriciteta, te o tome da će elektricitet uskoro biti ukroćen. Zatim je nastavio s veoma lijepim prikazom značaja ljudskog oka u usporedbi s drugim osjetlima, koji prilažemo niže u članku. Nakon toga je prešao s osjeta vida na svjetlost, te na glavnu temu predavanja.

Tesla je zamolio da sva svjetla u dvorani budu isključena, nakon čega je nastalo komešanje među slušačima, jer su se našli u potpunom mraku. Nakon par sekundi, Tesla je stojeći u mraku i smješeći se, iza masivnog stola dodirujući ruku izvodio eksperimente koji su pokazivali efekte elektrostatičke sile: iz njegovih su prstiju izbijali vatreni izdanci crvene i plave boje, iskre su izbijale “dovoljno

<sup>VI</sup> Vidi [Pejnović, *Nastavni vjesnik*, 1927., str. 195].



jake da bace čovjeka na pod, ali da ga ipak ne ubiju”, kao što je pojasnio. “Da je energija bila izravno usmjerena, ona bi mogla ubiti. U tom slučaju ne biste mogli vidjeti niti koju od zanimljivih stvari koje ću vam sada u nastavku pokazati”. Publika se srdačno nasmijala toj Teslinoj primjetbi, a još dvostruko više nakon što je osam do deset slušatelja (koji su sjedili na podu blizu stola) odpuzalo natrag do svojih mjesta, iz straha od misterioznog i pomalo bučnog eksperimenta.

Kasniji eksperimenti s fosforescentnom svjetlošću proizvodili su gotovo zasljepljujuće crveno svjetlo, koje je povećanjem frekvencije izmjenične struje postajalo bijelo i vrlo snažno. Tesla je nakon toga prešao na struje koje je puštao kroz svoje tijelo. Uzevši staklenu bocu u jednu ruku a u drugu žicu, žarulja je propuštanjem struje kroz njegovo tijelo bila upaljena. Publika je tim prizorom bila i občarana, ali i zastrašena.

Fosforescentno svjetlo nema tako blještavu bjelinu kao žarulja sa žarnom niti (u to vrijeme s ugljenom niti), te ima zelankasti odsjaj. Ali svjetlo koje je izlazilo iz predavačeva tijela bilo je dovoljno da osvijetli njegovu ruku, te kad je Tesla pojačao svjetlo i naglo promijenio snagu, občaranosti publike nije bilo kraja. Usklici “bravo” dolazili su od nazočnih s parketa i s balkona, kao i od eksperata u prvim redovima. Dame su živahno mahale svojim maramicama, pa je trebala cijela minuta dok predavač nije mogao u miru nastaviti dalje sa svojim predavanjem.

Međutim u nastavku su prikazani još nevjerovatniji eksperimenti. Uzevši u ruke dugačku staklenu cijev, duljine od preko jedan metar, predavač se opet spojio sa snažnom izmjeničnom strujom, te je u taj čas čitava cijev zasvijetlila fosforescentnom svjetlošću. Nakon toga je Tesla u zamračenoj dvorani počeo mahati s tom svjetlećom cijevi, vrtjeti ju oko središta amo-tamo iznad svoje glave. Eksperiment je bio utoliko nevjerovatniji što je struja koja je proizvodila svjetlost cijelo vrijeme eksperimenta prolazila kroz njegovo tijelo.

Tijekom predavanja eksperimenti su bili popraćeni Teslinim komentarima, te se činilo kao da ne brine o opasnostima kojima je izložen. Tesla je izgovorio nekoliko rečenica o svojim trijumfima: “Bio sam dvaput ili triput u životu nagrađen za napore kroz koje sam prolazio. Ovo današnje predavanje predstavlja jednu od nagrada meni, a nadam se da će ih biti i puno više. Možda ćete primijetiti da u ovome svemu što vam pokazujem za sada nema praktične primjene. Ali sada eksperimentiram u praktičnom smjeru, te sam oko toga postigao više uspjeha nego što vam večeras mogu ispričati.”

Tesla je zatim pokazao pokus u kojem je svjetlo bilo moguće upaliti bez ikakvih žica (tj. bezžično). Nije dobiveno tako jako svjetlo kao malo prije, ali ipak dovoljno da se pod njime može čitati, premda možda ne sasvim ugodno. Naglasio je da su ovi eksperimenti tek u svojim počecima, te da u skoroj budućnosti dolaze velike stvari. Tesla je obećao da će uskoro početi proizvoditi svjetlo na komercijalnim temeljima.

Nakon svojeg predavanja, mladi je električar bio obasut čestitkama i željama da primi gostoprimstvo istaknutih građana St. Louisa i vlasnika gradskih klubova. Tesla je sve te molbe skromno odklonio, dajući prednost miru i odmoru koje će nakon predavanja imati u svojoj hotelskoj sobi.

## **2. Teslino predavanje u koncertnoj dvorani u St. Louisu**

Ovdje sada iznosimo cijeli tekst članka o Teslinom nastupu u St. Louisu na izvornom engleskom jeziku, u kojem je izloženo puno više pojedinosti.<sup>VII</sup>

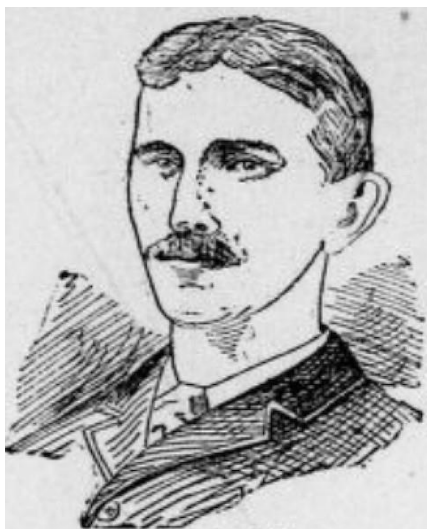
### **TESLA'S TRIUMPHS.**

#### **An Evening with the Montenegrin Electrical Wizard.**

#### **Marvellous Demonstrations, which Reveal the Fact that the Application of Electricity is As Yet to Its Infancy.**

St. Louis, March 2. - Seldom has the Grand Music hall in the exposition building been so densely crowded as last night, when Nikola Tesla gave a lecture and demonstration illustrative of his latest achievements in the way of electrical experiments. Five thousand tickets of admission had been issued, and as invitations had been limited to members of the leading clubs and other prominent citizens it goes without saying that the gathering was a very magnificent and representative one.

<sup>VII</sup> Postoje naznake da su povodom istog Teslina predavanja održanog 1. ožujka 1893. u St. Louisu objavljeni još neki članci, pa bi bilo od interesa doći i do njih. Jedan od njih je [The Tesla lecture in St. Louis] objavljen u tjednom časopisu *The Electrical Engineer* u Londonu.



Nikola Tesla.

Mr. Tesla's apparatus is of an apparently simple character. A plain deal table, very strongly constructed and some twenty feet long, contained the induction coils, disks and general apparatus, while on a smaller table were arranged a large number of vacuum bulbs, in appearance resembling the incandescent light bulbs in use for commercial and private purposes. On the left of the table was a very handsome circlet, brilliantly illumined and bearing the words: "St. Louis Electric Ex., 1893," worked around its border.

At about 8:30 o'clock between twenty and thirty of the leading electricians in the city in attendance on the electrical convention marched on the stage occupied seats at a safe distance from the experiment table, and a moment or two later President Ayer [James I. Ayer, president of the National Electric Light Association; D.Ž.] introduced the lecturer, obeying the wishes expressed him by Nikola Tesla and introducing him as such, without the prefix of either mister or professor.

The lecture and demonstration themselves were of a nature which had to be seen to be appreciated. The young lecturer responded in a pleasing manner to the gratifying reception given him, and proceeded at once with his address. Unlike many scientific lecturers who derive satisfaction from using long words when addressing unscientific audiences, and leaving them in doubt as to what is meant, Nikola Tesla appeared to be almost nervously anxious to make himself understood by the ladies and gentlemen before him, and those who had read of his marvellous achievements experienced little difficulty in following his line of thought through the evening.

Before going into the question of incandescent and phosphorescent light, the young Montenegrin [sic! DŽ] expert referred at some length to the connection between nature and electricity, and to the boundless force yet undeveloped, but in the near future to be brought under the control of man. He passed on to give a very pleasing summary of the value of the human eye, which he compared with the various other senses. Passing from sight to light the lecturer said that this brought him right to the subject he wished to bring before a St. Louis audience. He would abstain, as far as possible, from introducing purely scientific terms, and would, by the aid of the apparatus which was in view of the audience, produced a cluster in a manner hitherto deemed impossible. Turning to Mr. Ayer, Mr. Tesla said:

"Lights out, please."

The order was obeyed instantly, and for a moment there was a slight buzz of excitement, as the spectators and listeners found themselves in absolute darkness.

"If I have not made a mistake," went on Mr. Tesla, "I will now show you a phenomena which only scientific men can appreciate the greatness of. Pardon me if I do not do all I would wish, because it is so difficult to obtain the proper conditions in a large hall like this for an experiment of this delicate character."

There was a pause of a few seconds; Tesla stood, dark and smiling, behind his rude workbench and with his wizard touch made the darkness luminous with the trembling, zigzag flashes of gold and blue and purple light. In the experiment showing the effects of electrostatic force a small apparatus especially devised for the purpose was attached to the electric current, and Tesla seized the wires with a pair of iron and pliers, and at once there emanated from his finger tips a slimy haze of red and blue fire, and sparks leaped from point to point, "strong enough it might be to knock him down, but not to kill," as he explained, or it would interrupt his experiment. Then trembling lines of foggy light were sent streaming from the apparatus to a brass sphere. Then two copper plates of disks were set in action six inches apart and the light sent in distinct and vivid lines from one to the other as though attached together by molten wires. The effect was startling in the darkness, and aided by the ghoulish glee of the rumbling dynamo made a scene of appalling splendour.

"If the energy had been propelled directly it would have killed, and if I were to try the experiment of direct energy you would not be able to see any of the interesting things I am going to try and show you." The audience appreciated

the situation fully and laughed heartily at the remark; and the laughter was renewed with double force when some eight or ten of the gentlemen of the stage crept quietly back to their seats, out of which they had evidently been scared during the mysterious and somewhat noisy experiment. This portion of the lecture was of a strictly technical character, and most of the varying result were obtained by changing the bulbs used and increasing the power of the current and the frequency of the alternations.

Then came demonstrations of the ease with which Tesla can produce light by aid of one wire. He explained that it had always been regarded as necessary to produce electric light to have two wires, connecting one with one pole and the other with the other pole. He had found that it was quite possible to do it with only one wire, and producing an induction coil he proceeded to connect it with a single wire, on which he attached a bulb, from which the air had been extracted in the ordinary manner, and from which came a light at first faint and feeble, but under altered conditions, powerful, brilliant and finally dazzling. In some repeats even greater results were produced with the one wire than with the two, and the various reasons for this were listened to by the experts present with apparently great interest. When finally a light was produced from a single wire sufficient to light up the entire Marquette quite brilliantly, although the globe used was of the ordinary incandescent size, the delegates to the convention rose almost to a man and acknowledged the success of the experiment in a graceful and becoming manner.

Passing from the incandescent to the phosphorescent, Mr. Tesla proceeded to produce light without wires at all - that is to say, he produced a distant glow between two highly-charged disks without using a filament of any kind or any of the apparatus hitherto deemed indispensable for the purpose. An incandescent light, hung upon a single wire, but not connected with it, was made to produce an almost blinding red light, which by increasing the frequency of the alternations in the current, became finally white and powerful.

Mr. Tesla went on to pass electric currents through his body in a manner almost weird and certainly awful to the mind of those who have learned to regard electricity as a source of danger as well as profit to the human race. Taking a glass bulb in one hand and grasping a wire in the other the lecturer singled "lights out," and a second later the audience was both delighted and horrified to see the light emerge from the lecturer's hand.



A Weird Experiment.

The phosphorescent light thus produced lacks the dazzling whiteness of the incandescent and is somewhat green in appearance. But the light that apparently came out of the lecturer's body had sufficient illuminating power to make his hand and arm clearly visible, and when he raised the light and shook it several times the enthusiasm of the audience knew no bounds. As the lights were turned up the shouts of "bravo" came from parquet and balcony and from the experts close to the experimenter. The ladies waved their handkerchiefs, and several of the gentlemen were equally excited, and it was fully a minute before the lecturer could proceed.

Successful and wonderful as was this experiment it sank into insignificance compared with what followed. Taking in his hand a long glass tube, measuring three or four feet, the lecturer again connected himself with the powerful alternating current with his right hand, and the moment the lights were turned out the entire tube became phosphorescent. Standing on the stage with this illumined tube in his hand, the lecturer looked like some magician producing light, and a hum of admiration passed through the spectators. Next he put the tube high in the air and whirled it around his head several times. Then grasping it in the center, he twirled it to and fro much as the attendant at Donnybrook fair shakes his shillalah. This experiment was repeated again and again with increased power in the current until at last the vibrations were simply astounding and presented more the appearance of pyrotechnical display than

anything else. The grandeur of the affair was increased by the knowledge that every particle of current creating or developing the light had to pass through the body of the lecturer himself.

Still more remarkable was the appearance of a globe attached to a wire ten or twelve inches long. Again connecting himself with the current Mr. Tesla seized one end of this wire and deliberately plated ball with the phosphorescent light, producing pyratons and other dazzling and astonishing effects. Then he took a oblong tube or wire very much resembling in size and shape a slate frame and this again he played with in pleasant, simple and unaffected manner.

Throughout all these experiments the lecturer kept up a running comment, and seemed to be entirely unconcerned by the risks he appeared to be running. He admitted that when he first passed the current through his body he was somewhat alarmed, and he also mentioned the astonishment and amazement of an eminent English scientist to whom he made a demonstration before submitting the results to the public. Speaking of his triumphs he said: "I have been two or three times in my life recompensed for the trouble I have gone to. This was one of my recompenses, and I hope to have many more. You may see, perhaps, that there is no practical result in all this, but I am experimenting now in that direction, and have achieved more success than I can tell you tonight."

The next experiment was causing two wires, ten or twelve feet long, to phosphoresce over their entire length, and this experiment, shown in another phase, practically demonstrated the marvellous success of Tesla in producing a light strong enough for practical use without the aid of wires or exposed apparatus at all. It is not exactly bright, sliding light, such as that given by the arc lamp, or the pure white overpowering brilliancy of the incandescent, but the glow produced is a distinct light, good enough to enable a man to read by, although perhaps not quite comfortably. Mr. Tesla explained that the experiments in this direction were entirely crude and in their infancy, and although there was nothing in the lecture at all bordering upon boasting, there was a great deal of hope expressed as to what might be achieved in the future. Indeed, Mr. Tesla promised that in the early future he would produce light of this character on a commercial basis, and no one who witnessed the demonstrations and experiments last evening will be anxious to cross swords with the young inventor, or to dispute the possibility of his achieving any result he may desire or determine upon.

At the close of the lecture the young electrician was overwhelmed with congratulations to accept the hospitalities of prominent citizens and clubs, all of which he modestly declined, preferring the quiet and rest to be found at his hotel

### 3. Nikola Tesla o ljudskom oku i vidu (engleski izvornik)

Nikola Tesla je u uvodnom dijelu svojeg predavanja najprije opisao značaj ljudskog oka i vida u spoznavanju i učenju. Taj njegov opis po našem mišljenju predstavlja jedan od najljepših tekstova u pohvalu ljudskog oka koji je ikada napisan. Predavanje koje je održao u St. Louisu 1. ožujka 1893. bilo je pripremljeno već i za potrebe prethodnih dvaju nastupa: za predavanja koje je održao 1. veljače 1893. za Nacionalnu udrugu za električnu rasvjetu (1. veljače 1893.) te u uglednom Franklinovom institutu u Philadelphiji 24. veljače 1893., tj. tjedan dana prije predavanja održanog u St. Louisu. Ova prethodna dva predavanja bila su održana za stručnjake, pred puno manjim brojem osoba.

S obzirom na njegov značaj, niže navodimo početni dio Teslinog članka, koji se odnosi na značaj ljudskog vida, najprije na izvornom engleskom, a zatim i u hrvatskom prijevodu. Članak se nakon spomenutog uvodnog teksta o ljudskom oku zatim nastavlja s detaljnim opisom njegovih eksperimenata. Cijeli članak je dosta opsežan, te obasije blizu 80 stranica.<sup>VIII</sup>

#### **On Light and Other High Frequency Phenomena**

by Nikola Tesla

Franklin Institute, Philadelphia, February 24th, 1893

National Electric Light Association, St. Louis, March 1st, 1893

#### **INTRODUCTORY — SOME THOUGHTS ON THE EYE**

When we look at the world around us, on Nature, we are impressed with its beauty and grandeur. Each thing we perceive, though it may be vanishingly small, is in itself a world, that is, like the whole of the universe, matter and force governed by law, — a world, the contemplation of which fills us with feelings of wonder and irresistibly urges us to ceaseless thought and inquiry. But in all this vast world, of all objects our senses reveal to us, the most marvelous, the most appealing to our imagination, appears no doubt a highly developed organism, a thinking being. If there is anything fitted to make us admire Nature's handiwork, it is certainly this inconceivable structure, which performs its innumerable motions of obedience to external influence. To understand its

<sup>VIII</sup> Vidi [*The Autobiography of Nikola Tesla and Other Works*, Chapter XXVIII, On Light and Other High Frequency Phenomena, str. 542-620].



workings, to get a deeper insight into this Nature's masterpiece, has ever been for thinkers a fascinating aim, and after many centuries of arduous research men have arrived at a fair understanding of the functions of its organs and senses. Again, in all the perfect harmony of its parts, of the parts which constitute the material or tangible of our being, of all its organs and senses, the eye is the most wonderful. It is the most precious, the most indispensable of our perceptive or directive organs, it is the great gateway through which all knowledge enters the mind. Of all our organs, it is the one, which is in the most intimate relation with that which we call intellect. So intimate is this relation, that it is often said, the very soul shows itself in the eye.

It can be taken as a fact, which the theory of the action of the eye implies, that for each external impression, that is, for each image produced upon the retina, the ends of the visual nerves, concerned in the conveyance of the impression to the mind, must be under a peculiar stress or in a vibratory state. It now does not seem improbable that, when by the power of thought an image is evoked, a distinct reflex action, no matter how weak, is exerted upon certain ends of the visual nerves, and therefore upon the retina. Will it ever be within human power to analyze the condition of the retina when disturbed by thought or reflex action, by the help of some optical or other means of such sensitiveness, that a clear idea of its state might be gained at any time? If this were possible, then the problem of reading one's thoughts with precision, like the characters of an open book, might be much easier to solve than many problems belonging to the domain of positive physical science, in the solution of which many, if not the majority, of scientific men implicitly believe. Helmholtz has shown that the fundi of the eye are themselves, luminous, and he was able to see, in total darkness, the movement of his arm by the light of his own eyes. This is one of the most remarkable experiments recorded in the history of science, and probably only a few men could satisfactorily repeat it, for it is very likely, that the luminosity of the eyes is associated with uncommon activity of the brain and great imaginative power. It is fluorescence of brain action, as it were.

Another fact having a bearing on this subject which has probably been noted by many, since it is stated in popular expressions, but which I cannot recollect to have found chronicled as a positive result of observation is, that at times, when a sudden idea or image presents itself to the intellect, there is a distinct and sometimes painful sensation of luminosity produced in the eye, observable even in broad daylight.

The saying then, that the soul shows itself in the eye, is deeply founded, and we feel that it expresses a great truth. It has a profound meaning even for one who, like a poet or artist, only following his inborn instinct or love for Nature, finds

delight in aimless thoughts and in the mere contemplation of natural phenomena, but a still more profound meaning for one who, in the spirit of positive scientific investigation, seeks to ascertain the causes of the effects. It is principally the natural philosopher, the physicist, for whom the eye is the subject of the most intense admiration.

Two facts about the eye must forcibly impress the mind of the physicist, notwithstanding he may think or say that it is an imperfect optical instrument, forgetting, that the very conception of that which is perfect or seems so to him, has been gained through this same instrument. First, the eye is, as far as our positive knowledge goes, the only organ which is directly affected by that subtle medium, which as science teaches us, must fill all space; secondly, it is the most sensitive of our organs, incomparably more sensitive to external impressions than any other.

The organ of hearing implies the impact of ponderable bodies, the organ of smell the transference of detached material particles, and the organs of taste, and of touch or force, the direct contact, or at least some interference of ponderable matter, and this is true even in those instances of animal organisms, in which some of these organs are developed to a degree of truly marvelous perfection. This being so, it seems wonderful that the organ of sight solely should be capable of being stirred by that, which all our other organs are powerless to detect, yet which plays an essential part in all natural phenomena, which transmits all energy and sustains all motion and, that most intricate of all, life, but which has properties such that even a scientifically trained mind cannot help drawing a distinction between it and all that is called matter. Considering merely this, and the fact that the eye, by its marvelous power, widens our otherwise very narrow range of perception far beyond the limits of the small world which is our own, to embrace myriads of other worlds, suns and stars in the infinite depths of the universe, would make it justifiable to assert, that it is an organ of a higher order. Its performances are beyond comprehension. Nature as far as we know never produced anything more wonderful. We can get barely a faint idea of its prodigious power by analyzing what it does and by comparing. When ether waves impinge upon the human body, they produce the sensations of warmth or cold, pleasure or pain, or perhaps other sensations of which we are not aware, and any degree or intensity of these sensations, which degrees are infinite in number, hence an infinite number of distinct sensations. But our sense of touch, or our sense of force, cannot reveal to us these differences in degree or intensity, unless they are very great. Now we can readily conceive how an organism, such as the human, in the eternal process of evolution, or more philosophically speaking, adaptation to Nature, being constrained to the use of only the sense of touch or force, for instance, might develop this sense to

such a degree of sensitiveness or perfection, that it would be capable of distinguishing the minutest differences in the temperature of a body even at some distance, to a hundredth, or thousandth, or millionth part of a degree. Yet, even this apparently impossible performance would not begin to compare with that of the eye, which is capable of distinguishing and conveying to the mind in a single instant innumerable peculiarities of the body, be it in form, or color, or other respects. This power of the eye rests upon two things, namely, the rectilinear propagation of the disturbance by which it is effected, and upon its sensitiveness. To say that the eye is sensitive is not saying anything. Compared with it, all other organs are monstrously crude. The organ of smell which guides a dog on the trail of a deer, the organ of touch or force which guides an insect in its wanderings, the organ of hearing, which is affected by the slightest disturbances of the air, are sensitive organs, to be sure, but what are they compared with the human eye! No doubt it responds to the faintest echoes or reverberations of the medium; no doubt, it brings us tidings from other worlds, infinitely remote, but in a language we cannot as yet always understand. And why not? Because we live in a medium filled with air and other gases, vapors and a dense mass of solid particles flying about. These play an important part in many phenomena; they fritter away the energy of the vibrations before they can reach the eye; they too, are the carriers of germs of destruction, they get into our lungs and other organs, clog up the channels and imperceptibly, yet inevitably, arrest the stream of life. Could we but do away with all ponderable matter in the line of sight of the telescope, it would reveal to us undreamt of marvels. Even the unaided eye, I think, would be capable of distinguishing in the pure medium, small objects at distances measured probably by hundreds or perhaps thousands of miles.

But there is something else about the eye which impresses us still more than these wonderful features which we observed, viewing it from the standpoint of a physicist, merely as an optical instrument, — something which appeals to us more than its marvelous faculty of being directly affected by the vibrations of the medium, without interference of gross matter, and more than its inconceivable sensitiveness and discerning power. It is its significance in the processes of life. No matter what one's views on nature and life may be, he must stand amazed when, for the first time in his thoughts, he realizes the importance of the eye in the physical processes and mental performances of the human organism. And how could it be otherwise, when he realizes, that the eye is the means through which the human race has acquired the entire knowledge it possesses, that it controls all our motions, more still, and our actions.

There is no way of acquiring knowledge except through the eye. What is the foundation of all philosophical systems of ancient and modern times, in fact, of

all the philosophy of man? I am I think; I think, therefore I am. But how could I think and how would I know that I exist, if I had not the eye? For knowledge involves consciousness; consciousness involves ideas, conceptions; conceptions involve pictures or images, and images the sense of vision, and therefore the organ of sight. But how about blind men, will be asked? Yes, a blind man may depict in magnificent poems, forms and scenes from real life, from a world he physically does not see. A blind man may touch the keys of an instrument with unerring precision, may model the fastest boat, may discover and invent, calculate and construct, may do still greater wonders — but all the blind men who have done such things have descended from those who had seeing eyes. Nature may reach the same result in many ways. Like a wave in the physical world, in the infinite ocean of the medium which pervades all, so in the world of organisms, in life, an impulse started proceeds onward, at times, may be, with the speed of light, at times, again, so slowly that for ages and ages it seems to stay, passing through processes of a complexity inconceivable to men, but in all its forms, in all its stages, its energy ever and ever integrally present. A single ray of light from a distant star falling upon the eye of a tyrant in by-gone times, may have altered the course of his life, may have changed the destiny of nations, may have transformed the surface of the globe, so intricate, so inconceivably complex are the processes in Nature. In no way can we get such an overwhelming idea of the grandeur of Nature, as when we consider, that in accordance with the law of the conservation of energy, throughout the infinite, the forces are in a perfect balance, and hence the energy of a single thought may determine the motion of a Universe. It is not necessary that every individual, not even that every generation or many generations, should have the physical instrument of sight, in order to be able to form images and to think, that is, form ideas or conceptions; but sometime or other, during the process of evolution, the eye certainly must have existed, else thought, as we understand it, would be impossible; else conceptions, like spirit, intellect, mind, call it as you may, could not exist. It is conceivable, that in some other world, in some other beings, the eye is replaced by a different organ, equally or more perfect, but these beings cannot be men.

Now what prompts us all to voluntary motions and actions of any kind? Again the eye. If I am conscious of the motion, I must have an idea or conception, that is, an image, therefore the eye. If I am not precisely conscious of the motion, it is, because the images are vague or indistinct, being blurred by the superimposition of many. But when I perform the motion, does the impulse which prompts me to the action come from within or from without? The greatest physicists have not disdained to endeavor to answer this and similar questions and have at times abandoned themselves to the delights of pure and unrestrained thought. Such questions are generally considered not to belong to

the realm of positive physical science, but will before long be annexed to its domain. Helmholtz has probably thought more on life than any modern scientist. Lord Kelvin expressed his belief that life's process is electrical and that there is a force inherent to the organism and determining its motions. Just as much as I am convinced of any physical truth I am convinced that the motive impulse must come from the outside. For, consider the lowest organism we know — and there are probably many lower ones — an aggregation of a few cells only. If it is capable of voluntary motion it can perform an infinite number of motions, all definite and precise. But now a mechanism consisting of a finite number of parts and few at that, cannot perform an infinite number of definite motions, hence the impulses which govern its movements must come from the environment. So, the atom, the ulterior element of the Universe's structure, is tossed about in space eternally, a play to external influences, like a boat in a troubled sea. Were it to stop its motion it would die. Matter at rest, if such a thing could exist, would be matter dead. Death of matter! Never has a sentence of deeper philosophical meaning been uttered. This is the way in which Prof. Dewar forcibly expresses it in the description of his admirable experiments, in which liquid oxygen is handled as one handles water, and air at ordinary pressure is made to condense and even to solidify by the intense cold. Experiments, which serve to illustrate, in his language, the last feeble manifestations of life, the last quiverings of matter about to die. But human eyes shall not witness such death. There is no death of matter, for throughout the infinite universe, all has to move, to vibrate, that is, to live.

I have made the preceding statements at the peril of treading upon metaphysical ground, in my desire to introduce the subject of this lecture in a manner not altogether uninteresting, I may hope, to an audience such as I have the honor to address. But now, then, returning to the subject, this divine organ of sight, this indispensable instrument for thought and all intellectual enjoyment, which lays open to us the marvels of this universe, through which we have acquired what knowledge we possess, and which prompts us to, and controls, all our physical and mental activity. By what is it affected? By light! What is light?

We have witnessed the great strides which have been made in all departments of science in recent years. So great have been the advances that we cannot refrain from asking ourselves, Is this all true, or is it but a dream? Centuries ago men have lived, have thought, discovered, invented, and have believed that they were soaring, while they were merely proceeding at a snail's pace. So we too may be mistaken. But taking the truth of the observed events as one of the implied facts of science, we must rejoice in the immense progress already made and still more in the anticipation of what must come, judging from the possibilities opened up by modern research. There is, however, an advance

which we have been witnessing, which must be particularly gratifying to every lover of progress. It is not a discovery, or an invention, or an achievement in any particular direction. It is an advance in all directions of scientific thought and experiment. I mean the generalization of the natural forces and phenomena, the looming up of a certain broad idea on the scientific horizon. It is this idea which has, however, long ago taken possession of the most advanced minds, to which I desire to call your attention, and which I intend to illustrate in a general way, in these experiments, as the first step in answering the question "What is light?" and to realize the modern meaning of this word.

It is beyond the scope of my lecture to dwell upon the subject of light in general, my object being merely to bring presently to your notice a certain class of light effects and a number of phenomena observed in pursuing the study of these effects. But to be consistent in my remarks it is necessary to state that, according to that idea, now, accepted by the majority of scientific men as a positive result of theoretical and experimental investigation, the various forms or manifestations of energy which were generally designated as "electric" or more precisely "electromagnetic" are energy manifestations of the same nature as those of radiant heat and light. Therefore the phenomena of light and heat and others besides these, may be called electrical phenomena. Thus electrical science has become the mother science of all and its study has become all important. The day when we shall know exactly what "electricity" is, will chronicle an event probably greater, more important than any other recorded in the history of the human race. The time will come when the comfort, the very existence, perhaps, of man will depend upon that wonderful agent. For our existence and comfort we require heat, light and mechanical power. How do we now get all these? We get them from fuel, we get them by consuming material. What will man do when the forests disappear, when the coal fields are exhausted? Only one thing according to our present knowledge will remain; that is, to transmit power at great distances. Men will go to the waterfalls, to the tides, which are the stores of an infinitesimal part of Nature's immeasurable energy. There will they harness the energy and transmit the same to their settlements, to warm their homes by, to give them light, and to keep their obedient slaves, the machines, toiling. But how will they transmit this energy if not by electricity? Judge then, if the comfort, nay, the very existence, of man will not depend on electricity. I am aware that this view is not that of a practical engineer, but neither is it that of an illusionist, for it is certain, that power transmission, which at present is merely a stimulus to enterprise, will some day be a dire necessity.

It is more important for the student, who takes up the study of light phenomena, to make himself thoroughly acquainted with certain modern views, than to

peruse entire books on the subject of light itself, as disconnected from these views. Were I therefore to make these demonstrations before students seeking information — and for the sake of the few of those who may be present, give me leave to so assume — it would be my principal endeavor to impress these views upon their minds in this series of experiments.

It might be sufficient for this purpose to perform a simple and well-known experiment. I might take a familiar appliance, a Leyden jar, charge it from a frictional machine, and then discharge it. In explaining to you its permanent state when charged, and its transitory condition when discharging, calling your attention to the forces which enter into play and to the various phenomena they produce, and pointing out the relation of the forces and phenomena, I might fully succeed in illustrating that modern idea. No doubt, to the thinker, this simple experiment would appeal as much as the most magnificent display. But this is to be an experimental demonstration, and one which should possess, besides instructive, also entertaining features and as such, a simple experiment, such as the one cited, would not go very far towards the attainment of the lecturer's aim. I must therefore choose another way of illustrating, more spectacular certainly, but perhaps also more instructive. Instead of the frictional machine and Leyden jar, I shall avail myself in these experiments, of an induction coil of peculiar properties, which was described in detail by me in a lecture before the London Institution of Electrical Engineers, in Feb., 1892. This induction coil is capable of yielding currents of enormous potential differences, alternating with extreme rapidity. With this apparatus I shall endeavor to show you three distinct classes of effects, or phenomena, and it is my desire that each experiment, while serving for the purposes of illustration, should at the same time teach us some novel truth, or show us some novel aspect of this fascinating science. But before doing this, it seems proper and useful to dwell upon the apparatus employed, and method of obtaining the high potentials and high-frequency currents which are made use of in these experiments.

#### **4. Nikola Tesla o ljudskom oku i vidu (prijevod na hrvatski)**

U hrvatskom prijevodu priloženom u nastavku, koristimo pravopis kakav je u Hrvatskoj vrijedio otprilike u vrijeme održavanja Teslina predavanja 1893. Isti je pravopis bio na snazi i u vrijeme Teslina školovanja u Hrvatskoj, u Smiljanu, Gospiću i Rakovcu (danas dio Karlovca).<sup>IX</sup> Rabili smo i poznati *Hrvatsko-talijanski rječnik* Dragutina Antuna Parčića, objavljen u Zadru 1901. Orijentir nam je bilo i svjedočenje istaknutog hrvatskog kipara Ivana

<sup>IX</sup> Nismo se međutim priklonili tzv. “ahavizmima” (na primjer, “u knjigah”).

Meštrovića objavljeno u njegovoj značajnoj knjizi *Uspomene na političke ljude i događaje*, u kojoj je opisao i svoje susrete s Nikolom Teslom u SAD-u. Meštrović naglašuje da je u prepisci s Teslom primijetio da iz njegova pisanja izbija jezik *Narodnih novina*, a to znači jezik poznate *zagrebačke filološke škole*.<sup>X</sup> Meštrović citira i Teslino izričito negativno mišljenje o pravopisnim zasadama Vuka Stefanovića Karadžića.<sup>XI</sup>

Koliko nam je poznato, gornji Teslin tekst o ljudskom vidu se u ovom našem radu objavljuje po prvi puta na hrvatskom jeziku, kao i prethodni novinski članak o Teslinom predavanju u St. Louisu.

## O svjetlosti i drugim visoko-frekvencijskim pojavama

Nikola Tesla

Franklinov institut, Philadelphia, 24. veljače 1893.  
Nacionalna udruga za električno svjetlo, 1. veljače 1893.

### UVODNIK — NEKA RAZMIŠLJANJA O OKU

Kada promatramo svijet oko sebe, Prirodu, ushićeni smo njenom ljepotom i veličajnošću. Svaka promatrana stvar, pa i izčezavajuće mala, predstavlja svijet za sebe, tj. kao cijeli svemir, materija i sila upravljana zakonom, —svijet, čije nas spoznavanje ispunja osjećajem čuđenja i neizostavno nas potiče na neprestano razmišljanje i potragu. Ali u tom golemom svijetu svih objekata koje nam otkrivaju naša čula, najčudesniji i najprivlačniji za naše misli je, nedvojbeno, visoko razvijen organizam, misleće biće. Ako postoji išta što nas zadivljuje u stvaralaštvu Prirode, to je svakako ova neshvatljiva struktura, koja obavlja bezbrojna gibanja podčinjena vanjskim utjecajima. Razumjevanje njenog ponašanja, bolji uvid u ovo djelo Prirode, uvijek je bio fascinantna cilj mislioca, a nakon mnogih stoljeća dubokih istraživanja čovjek je došao do detaljnog razumijevanja funkcija njegovih organa i osjetila. Ponovno, u posvemašnjem skladu svojih dijelova, dijelova koji čine ili dodiruju naše biće, *oko* je najčudesnije od svih organa i osjetila. Ono je nevjerojatnije, najpotrebnije od svih spoznajnih ili pokrećućih organa, ono je veliki ulaz kroz koji znanje ulazi u naš um. Od svih organa, ono je jedino koje je najizravnije povezano s

<sup>X</sup> Podsjećamo da su iste *Narodne novine* godine 1892. opširno i vrlo lijepo izvjestile o Teslinu boravku u Zagrebu na poziv gradonačelnika dr. Milana Amruša

<sup>XI</sup> Pogledajte poveznicu navedenu u popisu literature uz Meštrovićevo ime na kraju ovog članka.



onim što zovemo intelektom. Ta je veza toliko čvrsta da se često kaže da se sama duša otkriva putem očiju.

Može se prihvatiti kao gotova činjenica, koja slijedi iz teorije djelovanja oka, da su za svaki vanjski podražaj, tj. za svaku sliku koja se stvara na retini, krajevi živčanih vlakana (koji moraju biti pod posebnom napetošću ili u stanju vibracije) odgovorni za prijenos signala umu. Ne čini se nevjerojatnim da, kad se snagom uma priziva neka slika, onda se udaljeno refleksno djelovanje, bez obzira koliko slabo, obavlja na odgovarajućim krajevima vidnih živaca, a prema tome i na retini. Hoće li ikada biti u ljudskoj moći proučiti stanje retine, uznemirene misaonim ili refleksnim djelovanjem, s pomoću nekog optičkog ili drugog postupka, da bi se jasna predočba njenog stanja mogla dobiti u bilo kojem trenutku? Kad bi to bilo moguće, problem čitanja nečijih misli u svim pojedinostima, kao i čitanja slova otvorene knjige, mogao bi biti puno jednostavnije riješen, nego mnogi problemi u području pozitivne fizikalne znanosti, u rješenje kojeg mnogi znanstvenici, ako ne i većina, neizravno vjeruju. Helmholtz je pokazao da su temelji očiju sami svijetlostni, te je on bio u stanju vidjeti, u potpunom mraku, gibanje svojih ruku u svjetlucanju svojih vlastitih očiju. Ovo je jedan od najzačudnijih eksperimenata ostvarenih u povijesti znanosti, a vjerojatno ga samo par osoba može zadovoljavajuće ponoviti, jer je lako moguće da je svjetlucanje očiju povezano s neuobičajenom aktivnošću uma i velikom imaginativnom snagom. Kao da se radi se o fluorescenciji moždane aktivnosti.

Druga činjenica koja potvrđuje ovu priču, koju su vjerojatno mnogi primijetili, budući da se nalazi u popularnim pripovjesticama, ali koje se ne mogu sjetiti da je zabilježena kao rezultat promatranja, je da povremeno, kada se neka ideja ili slika iznenada pojavi u našem umu, onda se pojavljuje različit i ponekad bolan osjećaj svjetlucanja u oku, primjetljiv čak i usred bijela dana.

Izreka da se tada duša pojavljuje u oku je duboko utemeljena i čini se kao da izražava veliku istinu. Ona ima veliko značenje za onoga tko, kao pjesnik ili umjetnik, slijedeći samo urođeni nagon ili ljubav prema Prirodi, nalazi ushićenje u bezciljnim mislima te u samom promišljanju prirodnih fenomena, ali ima još dublje značenje za onoga tko, u duhu pozitivnog znanstvenog istraživanja, teži otkrivanju uzroka i posljedica. U biti je fizičar onaj kojemu je *oko* predmet najvećeg divljenja.

Dvije činjenice o oku moraju nužno impresionirati duh fizičara, unatoč tome što može misliti ili reći da je to nesavršen optički instrument, zaboravljajući da je sam pojam savršenosti, ili mu se čini, bio usvojen posredstvom tog istog instrumenta. Najprije, oko je, barem prema našim sadašnjim znanjima, jedini

organ koji je izravno pod utjecajem suptilne tvari koja, kako nas uči znanost, ispunja sav prostor; drugo, to je najosjetljiviji među našim organima, daleko osjetljiviji prema vanjskim podražajima nego ikoji drugi.

Slušni organ podrazumjeva utjecaj dohvatljiva tijela, organ njuha - prijenos odvojenih materijalnih čestica, a organ okusa - dodira ili sile, izravan kontakt ili barem neki međuutjecaj dohvatljive tvari, a vrijedi čak i u slučaju životinjskih organizama, u kojih su u nekim slučajevima ti organi razvijeni do čudesnog savršenstva. Budući da je tako, čini se začudnim da je jedino vidni organ sposoban biti potaknut onim što svi naši drugi organi nisu u stanju niti razabrati, a ipak igra bitnu ulogu svim prirodnim pojavama koje šalju svu energiju i održavaju gibanje, a najdelikatnije od svega, život, ali koje ima vlastitosti takve da čak i znanstveno upućen um ne može razlikovati život od svega onog što zovemo materijom. Uzimljući u obzir samo to, kao i činjenicu da nam oko svojom čudesnom snagom proširuje inače vrlo usko područje vida daleko izvan granica malog svijeta u kojem se nalazimo, kako bismo obuhvatili milijarde drugih svjetova, sunaca i zvijezda u bezgraničnim dubinama svemira, trebalo bi opravdati tvrdnju da je to organ višega reda. Njegove mogućnosti su neshvatljive. Priroda, koliko nam je poznato, nikada nije stvorila nešto čudsnije. Jedva možemo imati slabašnu predočbu o njegovoj čudesnoj snazi razčlanjujući što sve čini i uspoređivanjem. Kada valovi etera nadražuju ljudsko tijelo, oni izazivaju osjećaj topline ili hladnoće, ugođe ili boli, ili možda druge osjećaje kojih nismo svjesni, ili svaki stupanj jakosti tih podražaja, kojih stupnjeva ima bezkonačno mnogo, pa prema tome i bezkonačno mnogo različitih podražaja. A naš osjećaj dodira, ili naš osjećaj sile, ne može nam otkriti te razlike u stupnju ili jakosti, osim ako su jako velike. Sada možemo lako shvatiti kako organizam kao što je ljudski, u vječnoj mijeni razvoja, ili govoreći filozofičnije, u prilagodbi Prirodi, omeđen uporabi jedino čula dodira ili sile, na primjer, može razviti taj osjećaj do takvog stupnja osjetljivosti ili savršenosti, da je u stanju razlikovati najsitniju razliku u temperaturi čak i tijela na nekoj udaljenosti, do stotnike, tisućine, ili čak milijuntinike stupnja. Ipak, ovo naoko nemoguće ostvarenje ne bi se moglo usporediti s mogućnostima oka, koje je sposobno razlikovati i proslijediti umu u jednom jedinom trenutku bezbrojne osobitosti tijela, bilo kao oblik, ili boju, ili neku drugu. Ova snaga oka oslanja se na dvije stvari, naime, na pravocrtnom prosljeđivanju promjena kojima je podložna, te njegovoj osjetljivosti. Kazati da je oko osjetljivo ne znači da nismo ništa kazali. U usporedbi s njime, svi drugi organi su grozno nepouzdana. Organ njuha koji vodi psa na putu do jelena, organ dodira ili sile koji vodi bubu tijekom njenih lutanja, slušni organi na koji utječu najsitnije promjene u zraku, su doista osjetilni organi, ali što su oni u usporedbi s ljudskim okom! Nema sumnje, ono odgovara na najslabiji eko ili promjene u mediju; nedvojbeno, ono nam donosi vijesti s drugih svjetova,

bezgranično daleke, ali jezikom koji nismo u stanju uvijek razumjeti. A zašto ne? Jer živimo u mediju ispunjenom zrakom i drugim plinovima, u parama u kojim lebdi gusta masa čvrstih čestica.

One igraju važnu ulogu u mnogim fenomenima; one gube energiju titranja prije nego dospiju do oka; one su također nositelji razornih klica, ulaze u naša pluća i druge organe, začepljuju kanale i neprimjetno, ali neminovno, onemogućuju tijek života. Ako bismo se samo mogli riješiti sve zamislive materije u vidokrugu teleskopa, to bi nam otkrilo neslućena čudesa. Čak i nepripremljenim okom, mislim da bismo bili u stanju razlikovati čisti medij, sićušne objekte na razdaljinama mjerenim vjerojatno stotinama ili čak tisućama kilometara.

Ali ima još nešto u vezi oka što nas uzhićuje još više nego ove čudesne osobitosti koje smo primijetili, gledajući ga s motrišta fizičara, kao najobičniji optički instrument, - nešto što nas privlači više od začudne sposobnosti biti pod izravnim utjecajem titranja medija, bez utjecaja glavnine materije, a više nego njegova nevjerojatno osjetljivost i snage razlučivanja. Njegova se važnost ogleda u životnom procesu. Kakvi god bili naši pogledi na prirodu i život, moramo biti zapanjeni kad, po prvi puta u svojim mislima, shvaćamo važnost oka u fizičkim procesima mentalnih ostvarenja ljudskog organizma. I kako može biti drukčije, kada shvaćamo da nam je upravo oko sredstvo s pomoću kojeg je ljudska rasa dobila cjelokupno znanje koje posjeduje, te da ono upravlja svim našim gibanjima i, štoviše, u svim našim djelovanjima.

Nema drugog načina stjecanja znanja nego okom. Što je temelj svih filozofskih sustava modernog vremena, zapravo sveukupne filozofije čovjeka? Postojim, dakle mislim; mislim, dakle postojim; postojim. Ali kako ću misliti i kako ću znati da postojim, ako nemam oka? Jer znanje uključuje svijest; svijet uključuje ideje, koncepte; koncepti uključuju crteže ili slike; a slike osjećaj vizije, pa prema tome i organ vida. Ali kako je sa slijepim osobama, bit ćete upitani. Da, slijepa osoba može opisati divne poeme, forme i prizore iz stvarnog života, iz svijeta kojega ne vidi. Slijepa osoba može dodirivati tipke instrumenta s nepogrešivom točnošću, može modelirati najbrži čamac, može otkriti i izumiti, računati i konstruirati, može učiniti i veća čuda - ali sve slijepe osobe koje su to ostvarile potječu od onih koji su videći. Priroda može dosegnuti iste rezultate na mnoge načine. Kao što val u fizikalnom svijetu u beskonačnom oceanu medija koji ga cijelog prožima, tako i u svijetu organizama, u životu, početni poticaj se nastavlja, ponekad možda brzinom svjetlosti, a ponekad možda brzinom takvom da stoljećima i stoljećima čini se kao da stoji, prolazeći kroz procese posve neshvatljive čovjeku, ali u svim svojim oblicima i stanjima njegova energija je vječito prisutna. Jedna jedina zraka svjetlosti s udaljene zvijezde koja pada u oko tirana u pradavno vrijeme, mogla je promijeniti tijek njegova života, mogla

je promijeniti sudbinu naroda, mogla je transformirati površinu zemlje, toliko su zakučasti i neshvatljivo složeni procesi u Prirodi. Nije moguće dobiti sveobuhvatnu predočbu veličajnosti Prirode kao kada smatramo da su, u skladu sa zakonom sačuvanja energije, tijekom beskrajna, sve sile u posvemašnjoj ravnoteži, pa prema tome energija jedne jedine misli može odrediti gibanje Svemira. Nepotrebno je da svaka osoba, čak niti svaka generacija ili mnoge generacije, posjeduju fizički instrument vida kako bi bili u stanju stvarati slike i misliti, tj. stvarati zamisli ili koncepte; ali u nekom trenutku, tijekom procesa evolucije, oko je svakako trebalo postojati, inače misao kakvu poznajemo ne bi bila moguća; također i koncepti kao što su duh, intelekt, um, zovi ga kako hoćeš, ne bi mogli postojati. Moguće je da je u nekom drugom svijetu, u nekim drugim bićima, oko zamijenjeno drugim organom, jednakim ili savršenijim, ali takva bića ne mogu biti ljudi.

Što nas potiče na namjerne kretnje i djelovanja bilo koje vrste? Ponovno oko. Ako sam svjestan kretanja, moram imati zamisao ili koncepciju, tj. sliku, pa prema tome i oko. Ako nisam sasvim svjestan kretanja, ono je, radi toga što su slike slabe ili nejasne, zasjenjeno međudjelovanjem mnogih kretnji. Ali kada izvodim gibanje, dolazi li poticaj za djelovanje iznutra ili izvana? Najveći fizičari nisu prezirali učiniti napor da odgovore na to i slična pitanja i povremeno se prepustili užiticima čistog i nesputanog promišljanja. Za takva se pitanja općenito smatra da su izvan područja pozitivne fizikalne znanosti, ali će uskoro biti usvojena u njeno područje. Helmholtz vjerojatno posjeduje više zamisli o životu nego ikoji drugi suvremeni znanstvenik. Lord Kelvin je izrazio vjerovanje da su životni procesi električni i da u svakom organizmu postoji nutarnja sila koja određuje njegove pokrete. Kao što sam siguran u svaku fizikalnu istinu, isto tako vjerujem da motivirajući podražaj mora doći izvana. Jer, promotrimo najniže organizme koje poznajemo - ima vjerojatno mnogo nižih vrsta - nakupina od samo par stanica. Ako je sposoban na proračunato gibanje, onda može izvesti beskonačno mnogo gibanja, svako od njih određeno i točno. Međutim mehanizam koji se sastoji od konačno mnogo dijelova ne može izvesti beskonačno mnogo određenih gibanja, prema tome impulsi koji upravljanju njegovim pokretima moraju potjecati iz okoliša. Prema tome atom, posljednji element strukture Svemira, vječito se giblje prostorom, igrom vanjskih utjecaja, kao čamac na uzburkanom moru. Ako bi zaustavio gibanje, umro bi. Materija u mirovanju, ako bi to moglo postojati, bila bi mrtva materija. Smrt materije! Nikada nije bila iskazana istina dubljeg filozofskog značnje. Upravo ga na taj način Prof. Dewar izražava u opisu svojih čudesnih eksperimenata, u kojim se tekućim kisikom upravlja slično kao što se upravlja vodom, a zrak pod normalnim tlakom se kondenzira i ukrućuje pod jakom hladnoćom. Pokusi koji služe da predoče (njegovim jezikom) najslabije kretnje

materije blizu su umiranja. Ali ljudsko oko neće svjedočiti takvoj smrti. Nema smrti materije, jer duž beskonačnog svemira sve se giblje i titra, tj. živi.

Predhodne sam tvrdnje formulirao riskirajući da ću odlutati u područje metafizike, sve u želji da uvedem predmet ovog predavanja tako da ne bude nezanimljiv, nadam se, slušateljstvu kojem imam čast obratiti se. Ali sada, vraćajući se temi, ovaj božanski organ vida, ovaj nuždan instrument za misao i sva intelektualna zadovoljstva, koji nam otvara čuda ovog svemira, putem kojeg smo primili znanja koja posjedujemo, koji nas upozorava i upravlja svom našom misaonom aktivnošću - što na njega utječe? Svjetlost? Što je svjetlost?

Svjedočimo velikim koracima ostvarenim u svim područjima znanosti tijekom posljednjih godina. Ti koraci su tako veliki da se ne možemo suzdržati i upitati, je li sve to istina, ili je to samo san? Stoljećima ranije ljudi su živjeli, mislili, otkrivali, pronalazili, vjerujući da su se uzdizali, dok su zapravo samo napredovali puževim korakom. Ali uzevši u obzir istinu promotrenih događaja kao jednu od znanstvenih istina, mora nas veseliti golem napredak koji je već ostvaren, a još više izčekivanje onoga što tek treba doći, sudeći prema mogućnosti koje je otvorilo suvremeno istraživanje. Ne radi se o otkriću, ili pronalasku, ili dostignuću u nekom posebnom smjeru. Radi se o napredku u svim smjerovima znanstve misli i pokusa. Mislim na poopćenja prirodnih sila i pojava, naziranje neke široke misli na znanstvenom horizontu. A to je zamisao koja je međutim davno opsjedala mnoge najnaprednije umove, kojoj želim svratiti vašu pozornost i koju namjeravam ilustrirati vrlo općenito u ovim eksperimentima, kao prvi korak u odgovoru na pitanje "Što je svjetlost" i pojasniti suvremeno značenje te riječi.

Izvan je domašaja mojeg predavanja upuštati se u predmet svjetlosti općenito. Moj je cilj samo svratiti sada vašu pozornost na jednu vrstu svjetlosnih efekata i na studij tih efekata. Ali da bih bio u skladu s mojim primjetbama, treba reći da, prema toj ideji, sada prihvaćenoj od većine znanstvenika kao pozitivan rezultat teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, različiti oblici i pojavnosti energije koje se obično označuju kao "električne" ili točnije "elektromagnetske", su pojavnosti iste naravi kao i izsijavanja topline i svjetlosti. Prema tome, fenomeni svjetlosti i topline i drugi, mogu se zvati električnim fenomenima. Na taj je način električna znanost postala majka svih znanosti i njezino proučavanje je postalo iznimno važno. Dan kada ćemo točno znati što je "elektricitet", bit će zabilježen ako događaj vjerojatno veći i važniji nego bilo koji drugi zabilježen u povijesti ljudske vrste. Doći će vrijeme kad će ugoditi, pa možda i samo postojanje čovjeka ovisiti o ovom čudesnom sredstvu. Za naše postojanje i ugodu zahtijevamo toplinu, svjetlost i mehaničku snagu. Kako to sve dobivamo? Dobivamo ih iz goriva, potrošnjom materijala. Što će čovjek učiniti

kada šume nestanu, kada se naslage ugljena iscrpe. Prema našem sadašnjem znanju, samo će jedna stvar preostati: prenositi snagu na velike udaljenosti. Čovjek će ići na vodopade, na plime, koje su izvori sićušnih dijelova beskonačne energije Prirode. Tamo će ukrotiti energiju i slati ju u svoja naselja, kako bismo ugrijali svoje domove, dobivali svjetlost i održavali svoje pokorne sluge - mašine, da rade. Ali kako će prenijeti tu energiju ako ne električnom? Kako ne bi onda ugodila, samo postojanje čovjeka, ovisilo o električnosti? Svjestan sam da ovo stanovište ne potječe od praktičnog inženjera, ali niti od iluzionista, jer je sigurno da će prijenos snage, koja je danas samo poticaj proizvodnji, biti jednog dana strašna potreba.

Važnije je za studenta, koji se zanima za studij svjetlosnih fenomena, da se temeljito upozna sa suvremenim pogledima, nego da prođe cijele knjige o predmetu samog svjetla kao da je nepovezano s tim pogledima. Ako bih držao ove eksperimente pred studentima koji traže informacije - a radi par njih koji su možda nazočni, moj glavni napor bio bi da ovim nizom eksperimenata utisnem te poglede u njihove umove.

Moglo bi biti dovoljno za tu svrhu izvesti jednostavan i dobro poznat pokus. Mogu uzeti poznati aparat, Leydensku bocu, nabiti je s pomoću elektrostatičkog generatora i zatim ju izbiti. Objašnjavajući vam njezino stalno stanje kad je nabijena, i njezino prijelazno stanje tijekom izboja, svraćajući vašu pozornost na sile koje ulaze u igru i na razne fenomene koje one proizvode, mogao bih u potpunosti uspjeti u ilustriranju te moderne ideje. Nema sumnje, misliocu će se ovaj jednostavni eksperiment dopasti isto kao i najčudesnija izložba. Ali ovo bi trebao biti eksperimentalni prikaz, onaj koji osim instruktivne ima i zabavne osobitosti, i kao takav jednostavan eksperiment neće doprinjeti ispunjenju predavačeve namjere. Moram radi toga odabrati drugi način ilustriranja, svakako dojmljiviji, ali možda i poučniji. Umjesto elektrostatičkog generatora i Leydenske boce, upotrijebit ću u ovim pokusima induksijski svitak neobičnih značajki, koji sam podrobno opisao tijekom predavanja pred Londonskim institutom inženjera elektrotehnike (London Institution of Electrical Engineers), veljače 1892. Ovaj induksijski svitak u stanju je proizvesti izmjenične struje enormne razlike potencijala, titrajuće ekstremnom brzinom. S tim aparatom nastojat ću vam pokazati tri vrste učinaka, ili fenomena, a moja je želja da nas svaki eksperiment, dok služi svrsi ilustriranja, istodobno pouči i nekoj novoj istini, ili nam pokaže neke nove aspekte te fascinantne znanosti. Ali prije toga, čini mi se prikladnim i korisnim zadržati se na upotrijebljenim spravama, kao i na načinu dobivanja visokih [razlika; D.Ž.] potencijala i visokofrekvencijskih struja koje ćemo rabiti u ovim pokusima.

...

Ovime je završen prijevod uvodnih devet stranica (str. 542-550) Teslina opsežnog članka *O svjetlosnim i drugim visoko-frekvencijskim pojavama* (On Light and Other High Frequency Phenomena).<sup>xii</sup> Taj uvodni tekst nosi podnaslov "Introductory - Some Thoughts on the Eye" (Uvodnik - neka razmišljanja o oku).

## Zahvala

Zahvaljujem dr. Goranu Slipcu (predsjedniku hrvatskog ogranka međunarodne udruge CIGRE) i dr. Božidaru Filipoviću-Grčiću (bivšem predsjedniku hrvatskog ogranka CIGRE-a) na pozivu da ovaj rad bude pripremljen. Zahvaljujem dr. Anti Čuvalu na poslanom novinskom članku objavljenom 1893. u SAD-u, s detaljnim opisom Teslina javnog predavanja održanog u St. Louisu pred više od 5000 slušača.

## Literatura

- [1] *The Autobiography of Nikola Tesla and Other Works* (introduction by Ken Mondschein, PhD), San Diego 2021 (742 str.); Teslin članak "On Light and Other High-Frequency Phenomena", objavljen u toj knjizi kao Chapter VIII, objavljen je u nastavcima također i u londonskom tjedniku *The Electrical Engineer* počevši od 9. lipnja 1893., a dostupan je na sljedećoj mrežnoj adresi <https://archive.org/details/electricalengin04unkngoog/page/580/mode/2up?ref=ol&view=theater&q=tesla> (preuzeto svibnja 2023.)
- [2] Ante Čuvalo: Croatian Educational Club in St. Louis, Missouri, 1910, na adresi <http://www.croatia.org/crown/articles/9457/1/> (preuzeto svibnja 2023.)
- [3] Ivan Meštrović: *Uspomene na političke ljude i događaje*, Buenos Aires, 1961., Knjižnica Hrvatske revije (o Tesli vidi str. 191-193), ili Matica hrvatska, Zagreb 1969. (o Tesli vidi str. 169-170); pogledajte također prilog dostupan na mrežnoj adresi [http://www.croatianhistory.net/etf/tesla\\_zg.html#teslap](http://www.croatianhistory.net/etf/tesla_zg.html#teslap) (preuzeto svibnja 2023.)
- [4] Dušan Pejnović: Iz života i rada Nikole Tesle, *Nastavni vjesnik*, Zagreb 1927, str. 192-202
- [5] Tesla's Triumphs, članak o Teslinom predavanju u St. Louisu objavljen 9. ožujka 1893. u časopisu *Iron County Register* (St. Louis) na str. 6. Članak je dostupan na mrežnoj adresi <https://chroniclingamerica.loc.gov/lccn/sn84024283/1893-03-09/ed-1/seq-6/> (preuzeto svibnja 2023.)
- [6] The Tesla lecture in St. Louis, *The Electrical Engineer*, March 8th, 1893, London, str.

<sup>xii</sup> Taj tekst je objavljen u [1] na str. 542-620 (primijetite da taj Teslin članak ima blizu 80 str.).

248-249, dostupno na adresi <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/articles/tesla-lecture-st-louis> (preuzeto svibnja 2023) U tom članku se tvrdi da je na Teslinom predavanju bilo više od 4000 ljudi.

- [7] Darko Žubrinić: *Nikola Tesla*, dostupno na mrežnoj adresi Zavoda za primijenjenu matematiku Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, [https://www.fer.unizg.hr/zpm/djelatnici/red\\_prof/darko/nikola\\_tesla](https://www.fer.unizg.hr/zpm/djelatnici/red_prof/darko/nikola_tesla) (preuzeto svibnja 2023.)

*Darko Žubrinić*





*Dragan Poljak*  
Sveučilište u Splitu/FESB  
dpoljak@fesb.hr

## **O TESLINIM IDEJAMA BEŽIČNOG PRIJENOSA INFORMACIJA I ENERGIJE U SVJETLU SUVREMENE TEORIJE ŽIČANIH ANTENA**

**Sažetak:** U radu se razmatra Teslina uloga u razvoju radija s naglaskom na izvornu Teslinu viziju bežičnog prijenosa energije i informacija. Dan je prikaz nekadašnjih Teslinh osnovnih koncepata te usporedba s današnjim znanstvenim i tehničkim dostignućima u okviru ove problematike. U tom smislu dan je osvrt na povijesne aspekte vezane za Tesline eksperimente sa strujama visokih frekvencija, zapise iz Colorado Springsa na prijelazu i 19. u 20. stoljeća, nedovršenog Wardencliffa (Tesling) tornja koji je trebao predstavljati oživotvorenje Teslinog koncepta bežičnog prijenosa energije, a posebna pozornost posvećena je analizi Teslinog odašiljača kao i koncepta propagacije valova kroz Zemlju primjenom suvremene teorije antena i teorije prijenosnih linija. Analiza je provedena uz primjenu analitičkih i numeričkih postupaka.

**Ključne riječi:** Nikola Tesla, radio, bežični prijenos energije, Colorado Springs, Long Island

### **Uvodne riječi**

Krajem 19. stoljeća ideja o bežičnom prijenosu snage na velike udaljenosti u je potpunosti obuzela Nikolu Teslu. Iako ne u izvornom obliku, ideja Nikole Tesle u posljednjih par desetljeća vitalnija je nego ikad i sve više pobuđuje interes ne samo u akademskim krugovima, već se ozbiljno razmatraju i brojne primjene ovog koncepta [1]. Intencija ovog rada je da se u svjetlu suvremenih znanstvenih

činjenica sagledaju Tesline zamisli i postignuća na bežičnom prijenosu energije te barem donekle ocrta slojeviti lik velikog izumitelja i vizionara, naravno u kontekstu vremena i društva u kojem je djelovao.

Nikola Tesla bio je i humanist, znanstvenik, filozof..., a njegove ideje postavile su temelj gotovo svemu što snabdijeva naš svijet energijom i informacijom. Bez njegovih pronalazaka svjetski rasprostranjena elektrifikacija ne bi bila moguća pa ga se u biografijama nerijetko naziva čovjekom koji je izumio dvadeseto stoljeće.

*Električna snaga koja teče iz naših velikih generatora, osvjetljavajući naše velike gradove, rastjerujući crninu noći, i telekomunikacije koje sjedinjuju domove i radna mjesta naše civilizacije, preko kontinenata, oko globusa i kroz udaljene točke prostora – sve su ovo spomenici koji svjedoče o uspješnom životu ovog malo poznatog, ali jedinstvenog, znanstvenika, izumitelja, inženjera, futurista i građanina svijeta..*

JAMES CORUM

Tako se brojne njegove ideje vežu za suvremene tehnologije od bežičnih komunikacijskih sustava, radara, televizije, robotike, kompjutera, telefaksa, interneta, pametnih telefona.

Na prijelazu 19. u 20. stoljeće Nikola Tesla provodio je svoje eksperimente na bežičnom prijenosu snage [2]. Kao već dokazani izumitelj u području generiranja i prijenosa energije žicama na ekstremno niskim frekvencijama čvrsto je vjerovao kako je, uz prienos komunikacijskih signala, vrlo blizu realizacije bežičnog prijenosa snage svojim *Svjetskim sustavom* [3]. Primjenom svog odašiljača i izmjeničnih struja Tesla se nadao kako će proizvesti oscilacije električne energije koje će se širiti kroz Zemlju te tako stvoriti stojne valove u koje će onda potrošači moći „uhvatiti“ svojim prijemnim antenama postavljenim na optimalnim lokacijama [4]. Dakle, tražio je mogućnost primjene prijenosa električne energije na veliku udaljenost bez žica na temelju fenomena rezonancije.

Nikada nije uspio osigurati dostatna financijska sredstva da bi tu svoju ideju razradio, i usprkos brojnim dokazima da je zaslužan za značajne doprinose razvoju radija u njegovoj početnoj fazi Teslino ime nije se pojavilo među šest pionira radija u izboru European Broadcasting Union [5].

Među suvremenim idejama koje se vežu za Teslinu viziju bežičnog prijenos energije često se spominje koncept solarnog satelita [1] za prienos snage kojeg bi trebalo sagraditi u Zemljinoj orbiti da prikupi sunčevo zračenje i izvrši konverziju u energiju sadržanu u mikrovalovima koju bi u snopu trebalo prenijeti na Zemlju, gdje bi se onda izvršila prijetvorba mikrovalova u konvencionalnu električnu snagu.

Nikola Tesla umro je u dobi od 87 godina u potpunom siromaštvu u New Yorku u zimu 1943. godine sam u hotelskoj sobi okružen jedino golubovima.

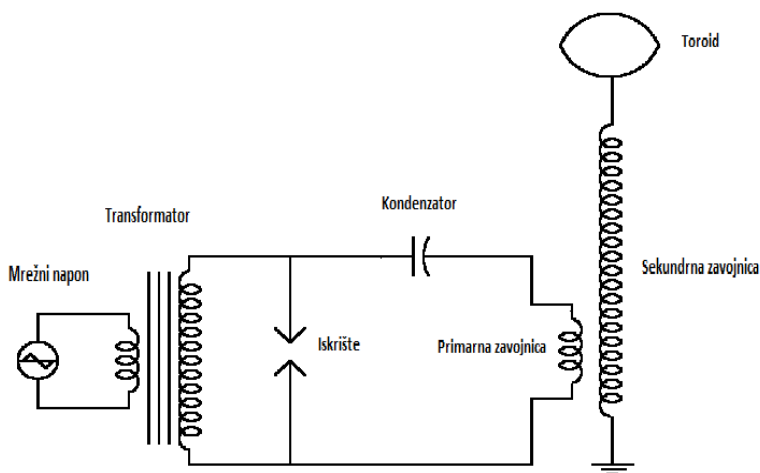
Bilo je to 7. siječnja 1943. godine u sobi br. 3327 na 33. katu Hotela New Yorker. Čovječanstvu je ostavio neprocjenjivu dobrobit, a na svoje posljednje putovanje zaboravljeni genij znanosti o elektricitetu, napušten od svih, ponio je samo gorčinu i razočaranje koji su ga pratili u drugoj polovini njegovog dugog života [6].

U ovom radu, posvećenom 165. godišnjici rođenja Nikole Telse prvo se analiziraju povijesne činjenice o Teslinom istraživanju na problemu bežičnog prijenosa snage, a potom se primjenom suvremenih standardnih metoda klasične elektrodinamike u smislu rigorznih modela iz teorije žičanih antena analiziraju njegove ideje vezane za odašiljač u sagrađen u Colorado Springs-u te konceptu propagacije valova kroz Zemlju kojeg je pokušao ostvariti u okviru izgradnje Wardenclaffe tornja.

Konačno, slijede završna razmatranja.

## **1. Povijesni razvoj Tesline ideje prijenosa električne energije bez žica**

U ljeto 1889. Tesla je otputovao u Pariz i prisustvovao predavanju norveškog istraživača Vilhelma Bjerknesa koji je demonstrirao eksperimente Heinricha Hertza provedenih u svrhu detekcije elektromagnetskih valova čije je postojanje predviđala teorija Jamesa Clerka Maxwella. Pri povratku u svoj laboratorij u Grand Street u New Yorku Tesla ponavlja Hertzove eksperimente uz nešto drugačiji eksperimentalni postav. Uskoro, 1891. godine Tesla, fasciniran svim mogućnostima koje pruža fenomen rezonancije dolazi do otkrića oscilirajućeg transformatora, kojeg će uvelike koristiti i drugi istraživači, i koji će uskoro postati poznat pod nazivom Teslina zavojnica. Hertzov uređaj za generiranje elektromagnetskih valova sastoji se od zatvorenog kruga koji sadrži bateriju te dijela za automatski prekid kruga. Problem Hertzovog rezonatora je iznimno niska efikasnost. Kod Tesline zavojnice kondenzator i iskrište su premješteni u primarni krug čime je omogućen prijenos značajne količine energije s odašiljača na prijemnik, slika 1 [7].



Sl. 1: Osnovna shema Teslinog uređaja

Nikola Tesla, tada izumitelj u naponu snage intenzivno eksperimentira sa strujama visokih frekvencija te 1893. godine daje prvu demonstraciju bežičnog komuniciranja, a u svojim člancima i predavanjima detaljno opisuje svoj radio uređaj. Dvije godine kasnije Marconi predstavlja svoj radio uređaj u Londonu prikazujući ga kao vlastiti izum, kasnije tvrdeći kako nije imao uvida u Tesle radove...

*Emisija i prijem signala Marconijevim električnim oscilacijama nije ništa novo. U Americi, poznati inženjer Nikola Tesla proveo je iste eksperimente 1893.*  
ALEXANDER POPOV

Godine 1895, veliki požar potpuno je uništio Teslin laboratorij. Mada je opremio novi laboratorij u East Houston Street, požar je Teslu dosta unazadio materijalno, a pogotovo u emocionalnom smislu pa je bio izložen i cikličkim napadima depresije. Naime, uz periode u kojima je bio prepun energije i briljantnih ideja, zračio ekstremnim optimizmom, ali postojali su i tamni periodima u kojima je, zatvoren u svojoj hotelskoj sobi, tjednima izbjegavao čak i prijatelje, kako svjedoče neki detalji u njegovoj korespondenciji. Jedan od pokazatelja da nešto nije bilo u redu u s njim u ovom periodu je svakako i izostanak prijave patenata 1894. i 1895. godine.

Svoj prvi patent vezan za radiokomunikacije, patent No 645576, Nikola Tesla registrira 1897. godine, a godinu dana kasnije konstruira daljinski upravljani brod te demonstrira ovu tehnologiju u New Yorku. Ovaj izum registriran je pak u okviru patenta No 613809.

*Tesla je prvi demonstrirao prijenos i prijem bežičnih signala primjenom sustava prلاغođenih odašiljača i prijemnika.*

JOHN S. BELROSE

Na prijelomu stoljeća, 1899. godine, Tesla gradi veliku radio stanicu u Colorado Springs-u i započinje sa svojim eksperimentima koje bilježi u obliku svojevrsnog dnevnika što će postati čuveni: *Zapisi iz Colorado Springs-a* [2].

Sljedeće godine, međutim, Marconi započinje uspješnu distribuciju i marketing svoje radio aparature.



Sl. 2: Nikola Tesla u naponu snage krajem 19. stoljeća

Teslin grandiozni cilj bio je konstrukcija posebne vrste odašiljača koji bi, osim informacija, prvenstveno omogućio prijenos snage na velike udaljenosti. Tako je Tesla projektirao svoje pojačalo-odašiljač, pomoću kojega je bio u stanju efikasno emitirati, prema vlastitim riječima, *Hertzove valove*, ali i, *struje kroz zemlju*, ovisno o strukturi uređaja. Vrijedi istaknuti da je, prema svom dubokom uvjerenju Tesla bežični prijenos *Hertzovim valovima* smatrao potpuno neefikasnom metodom u usporedbi sa svojim vlastitom konceptom.

Umjesto da razmatra odašiljač koji šalje radio valove u slobodni prostor do prijemnika Tesla, ima ideju o odašiljaču koji bi emitirao valove kroz Zemlju do prijemnika a da se onda slobodni prostor koristi kao povratna staza.

U konačnici Tesla je smatrao kako bi bilo moguće slati valove kroz Zemlju upravo na rezonantnoj frekvenciji Zemlje, i tako bi onda na pulsirajućem planetu bilo moguće izvlačiti ovu energiju na odgovarajućim prijemnim stanicama postavljenim po čitavom svijetu.

Kroz ovakvu zamisao bežičnog prijenosa Tesla je snivao o prijenosu električne snage, telefonskih usluga, slika..., ali usprkos svojim kontaktima s bogatim i utjecajnim ljudima po New Yorku Tesla nije pribavio dostatna sredstva za svoja istraživanja.

Godine 1901., Tesla entuzijastično započinje konstrukciju ogromne radio stanice u Wardenclyffe-u, na Long Islandu blizu New Yorka koja nikada nije stavljena u punu funkciju. S druge strane, Marconi je iste godine prenio prvu poruku preko Atlantika zapravo koristeći uspješno tada već 4 godine postojeći Teslin patent No. 645576.

Nakon Marconijeva trijumfa J.P. Morgan u potpunosti dokida financijsku potporu Teslinim aktivnostima. Uslijedo je niz teških živčanih slomova kroz koje je Tesla prolazio tijekom 1904. i 1905. godine. Sasvim uvjeren da radi na ispravnoj zamisli, ali onemogućenoj zbog nedostatka novca Tesla se potpuno slomio.

Godine 1917. Tesla u svom radu objavljenom u časopisu *Electrical Experimenter* najavljuje sustav za lociranje metalnih objekata primjenom refleksije radio signala, što se može smatrati početkom radara. Iste godine srušen je WardenClyffe tower na Long Islandu...

Četrdesetak godina kasnije u lipnju 1943., gotovo pola godine nakon Tesline smrti i 6 godina nakon Marconijeve smrti *Supreme Patent Court* u SAD-u donosi presudu u korist Nikole Tesle kao istinskog tvorca bežičnog prijenosa i radija navodeći činjenicu kako u Marconijevom patentu No. 763772 iz 1904. godine nije bilo ničeg novog u odnosu na ranije Tesline patente. Marconijevu tvrdnju kako nije znao za Tesline patente američki sud je odbacio.

*Jednostavan nacrt, zasnovan na Teslinu predavanju (prikazivanju) iz 1893. godine, predstavlja rođenje bežičnih komunikacija.*

JAMES R. WAIT

Zašto je Tesla dopustio da Marconi sebi prigrabi ulogu tvorca radija na samom početku 20. stoljeća? Prvenstveno zbog činjenice da je Tesla osim informacija želio bežičnim putem prenijeti energiju čitavom planetu i osigurati čovječanstvu tehnološko blagostanje. Kako je već istaknuto Teslin glavni financijer Morgan nije našao razumijevanja za taj Teslin najveći životni san.

*S povijesne točke gledišta, Nikola Tesla zamislio je svjetski komunikacijski sustav koristeći veliki odašiljač u Colorado Springsu 1899. Na žalost, njegov sponzor je obustavio financijsku potporu. Teslini eksperimenti međutim imaju frapantnu podudarnost s budućim razvitkom niskofrekvencijskih komunikacija.*

JAMES R. WAIT

Dijelom Tesli svakako nije išla na ruku ni činjenica da je sredinu devedesetih godina devetnaestog stoljeća obilježila i snažna ekonomska kriza, zapravo preteča teške depresije s kraja dvadesetih i početka tridesetih godina 20. stoljeća. Ovakva ekonomska situacija u kombinaciji s izostankom Teslinog fokusiranja na jednostavnu izvedbu bežičnog sustava za prijenos informacija usmjerava investitore prema Marconiju, Fessendenu, DeForestu i drugima koji su eksperimentirali s elektromagnetskim valovima i usavršavali komercijalne bežične sustave. Jasno je da su takvi istraživači, a posebno Marconi koji je poslao prvu poruku preko Atlantika, dijelom zaslužni za razvoj radio prijenosa, ali ga nipošto nisu izumili. To bilo djelo Nikole Tesle.

*...Tesla zaslužuje trajnu zahvalnost čovječanstva.*

ARTHUR A. COMPTON

Nikola Tesla umro je 7. siječnja 1943. godine u Hotelu New Yorker, a odmah nakon smrti njegovi znanstveni radovi i spisi nestali su iz sobe. Neki od ovih zapisa zasigurno su sadržavali i poneku informaciju o njegovom radu na bežičnom prijenosu energije.

Iako je na samom početku 20. stoljeća Tesla bio zaustavljen u svojim istraživanjima o bežičnom prijenosu snage ta njegova ideja nastavila je svoj život do danas.

Kasnih 30-tih godina 20. stoljeća sljedbenici Tesline ideju bežičnog prijenosa energije fokusirali su se na primjenu mikrovalnih snopova.

*Koristeći prednost koju pruža povijesna perspektiva jasno nam je kako su Teslini pokušaji efikasnog prijenosa snage bežičnim putem bili desetljećima ispred postojeće tehnologije.*

WILLIAM C. BROWN

Nakon 2. svjetskog rata mikrovalni odašiljači velike snage su postali dovoljno efikasni za mikrovalni prijenos energije (MPT - *Microwave Power Transfer*), pri čemu su ključna otkrića klistrona i magnetrona te paraboličkih reflektora čime je omogućeno fokusiranje tako stvorene energije u uske snopove. Do danas najambicioznija ideja koja se veže za bežični prijenos snage svakako je koncept satelitskog sustava za prikupljanje sunčeve energije (SPS - *Solar Power Satellite*) [8].

Naime satelit pozicioniran u geostacionarnoj orbiti prikupljao bi sunčevu energiju pomoću ogromnog kolektora, koju bi zatim u vidu mikrovalova izračio na površinu planeta. Takvu solarnu svemirsku stanicu za prijenos snage izvorno je predložio P.E. Glaser još 1968. godine dok je bežični prijenos snage preko mikrovalnog zračenja predložio W. C. Brown još ranije, odnosno 1960. godine [9]. Na tragu ove ideje, 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća, uspješno je demonstriran prijenos 30 kW snage na udaljenosti od nekoliko kilometara, međutim, sljedećih 20 godina u SAD-u, daljnja financijska podrška projektu značajno je smanjena, a glavni interes se prebacio u Japan, koji je najavio realizaciju ovog projekta u periodu od 2030. do 2040. godine.

Iako postoje razni koncepti, znanstveni radovi i patenti koji se odnose na bežični prijenos energije, puni razvitak komercijalne tehnologije se tek očekuje. Prema Williamu C. Brownu primarne komponente uključuju izvor mikrovalnog zračenja, odašiljačku antenu i prijemnu antenu. Izvor mikrovalnog zračenja sastoji se od magnetrona s pripadnom elektronikom za regulaciju izlazne snage. Ispravljačka antena (eng. *rectifying antenna*, skraćeno *rectenna*) prima odaslanu mikrovalnu snagu i pretvara je u snagu istosmjerne struje.

Posljednjih desetak godina u okviru SPS tehnologije 2010. godine navode se, između ostalog,; frekvencija od 2.45 do 5.8 GHz, transmitirana RF snaga od 1.4GW, dijametar odašiljačkog niza od 2km, stotine milijuna elemenata, gustoća snage u centru ispravljačke antene iznad Zemlje u iznosu 300W/m<sup>2</sup> uz dijametar antene od 4km. Još 2001. godine razmatrajući sigurnost za ljude od posljedica zračenja takvog sustava navodi se kako bi ispravljačku antenu trebalo locirati u brdovitim nenaseljenim područjima, pustinjama ili možda na morskoj površini. Do danas SPS ostaje još uvijek prvenstveno idejni koncept.

Vrijedi istaknuti kako u današnje vrijeme problematika bežičnog prijenosa snage ne ostaje samo u sferi elektrotehnike i fizike. Ovo područje istraživanja sve više poprima multidisciplinarni karakter koji obuhvaća kvantnu biologiju i biomedicinske znanosti [1].

## **2.Colorado Springs i Long Island – Zašto nije ostvarena Teslina zamisao o bežičnom prijenosu energije?**

Svoja istraživanja na području izmjeničnih struja visokih frekvencija kao i bežičnog prijenosa energije Tesla je započeo početkom posljednjeg desetljeća 19. stoljeća. Uočavajući efekte koje ove struje pokazuju na visokim frekvencijama Tesla je postupno bivao sve uvjereniji kako je bežični prijenos snage moguć pomoću vodljivih svojstava Zemlje i izolirajućih svojstava atmosfere.

Godine 1899 u Colorado Springsu Tesla osmišljava svoj koncept bežičnog prijenosa energije temeljen na rezonanciji Zemlje pobuđene valovima niskih frekvencija koji se propagiraju kroz Zemlju i njenom površinom, odnosno u



sfernom valovodu (rezonantnoj šupljini) između površine Zemlje i ionosfere. Uočio je da se emitirani signal vraća na predajnik u točno određenim vremenskim razmacima koji odgovaraju modelu Zemlje kao titrajnog kruga s rezonantnom frekvencijom koja je višekratnik od 6 Hz, no tada uglavnom nije ozbiljnije shvaćen, a svoja zapažanja opisao je tek u nekoliko patenata i radova.

Tek desetljećima kasnije, očito neupoznat s Teslinim prethodnim radom, njemački fizičar W. O. Schumann istražuje Zemljinu prirodnu rezonanciju. Rezonantne frekvencije su 7.83 (najizraženija), 14, 20, 26, 33, 39 i 45 Hz (najslabija) s dnevnim varijacijom od približno  $\pm 0,5$  Hz. Prividna razlika između rezultata Tesle i Schumanna često je kasnije pogrešno interpretirana kao Teslino predviđanje elektromagnetskih valova koji se propagiraju brže od svjetlosti. Međutim, osnovni harmonik od 6 Hz je izveden iz koherentnog vremena zemljinog sfernog valovoda (prema Teslinim mjerenjima 84,84 ms) koje odgovara Schumannovoj frekvenciji od 7.5 Hz [3], [10].

*... ovaj veliki genije jasno iznosi ideju o zemlji kao rezonantnom krugu (nije znao za ionosferu) i procjenjuje najnižu rezonantnu frekvenciju na oko 6Hz (blizu 6.6Hz za idealno vodljivu sferu) te opisuje generiranje i detekciju ovih valova.*

JOHN D. JACKSON

Pokušavajući shvatiti suštinu mehanizma propagacije radio valova na velikim udaljenostima Tesla je zaključio kako se jedan dio odaslane snage propagira kroz Zemlju, odnosno duž površine Zemlje, što je nazivao *strujnim valom* ili *nehertzijanskim valom*, dok je komponentu vala na Zemlji Tesla nazivao *Hertzovim valom*. Danas se Teslin *strujni val* naziva *površinskim valom*, a radi se o valu koji se širi tlom, dok se za Hertzov val se koristi naziv prostorni val. Na niskim frekvencijama ovi se valovi mogu širiti na velike udaljenosti dok je za propagaciju radio-valova visokih frekvencija značajna uglavnom ionosfera, što je eksperimentalno dokazana tek 1925. godine.

U zabilješkama iz Colorada Springsa Tesla je opisao neke primjere bežičnog prijenosa snage, ali sve što se može iščitati iz njegovog dnevnika ukazuje na prijenose na male udaljenosti.

*Teslina zamisao bila je da se sama zemaljska kugla uspostavi u rezonantni mod na frekvencijama reda veličine 10Hz. Smatrao je da se energija reflektirala od suprotne točke od njegovog odašiljača u Colorado Springsu na način da je uspostavljen stojni val.*

JAMES R. WAIT

Teslinom zavojnicom postizale su se rezonancije na 150KHz, a bila je napajana s 300kW niskofrekvencijske snage koju je mogao dobiti od Colorado Springs Electric Company. Prema Tesli proizvedeni RF napon iznosio je 100MV u

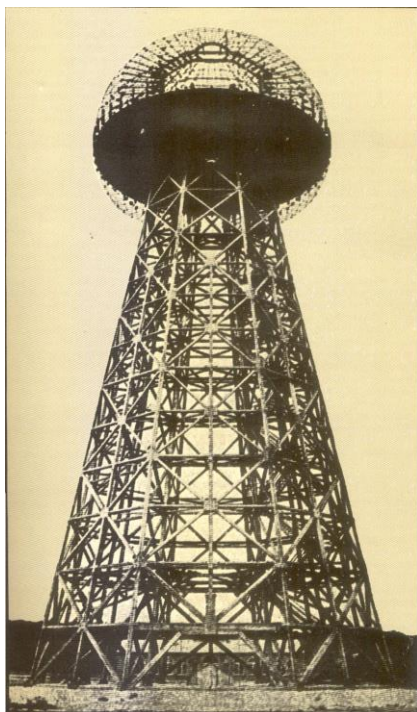
odnosu na površinu Zemlje. Na žalost, ne postoje jasni zapisi o tome koliko je snage bilo izračeno niti je li ikakav značajniji iznos ove snage sakupljen na nekoj većoj udaljenosti.

Nakon odašiljača u Colorado Springs-u, slijedio je Teslin poduhvat poznat kao Wardenclyffe Tower, slika 4. Teorijski, ovaj odašiljački toranj trebao je emitirati signale bežično, kroz Zemlju koja bi djelovala kao vodljivi objekt, do prijemnika koji je mogli biti smješteni bilo gdje uzduž planeta.



Sl. 3: Teslin odašiljač u Colorado Springs-u

Naime, Tesla je vjerovao da će strujni val koji će proizvesti njegov odašiljač putovati kroz Zemlju do točke nasuprot Wardenclyffe-u i vratiti se nazad te biti u fazi s odlaznim valom i tako oblikovati stacionarni (stojni) val. Vjerovao je da se energija i informacija mogu prikupiti bilo gdje na Zemlji uz odgovarajući prijemnik.



Sl. 4: Wardencliff toranj

Postojali su, naravno, i brojni inženjerski problemi u praktičnoj izvedbi tornja [4]. S druge strane, za Marconija je Tesla izjavio da šalje „samo“ komunikacijske signale dok će on biti u stanju odaslati električnu snagu bežičnim putem. Tesla je na neki način „zavlačio“ Morgana da kontinuirano radi na konstrukciji komunikacijskog sustava, ali zapravo je radio na ostvarenju svog koncepta bežičnog prijenosa energije. Bez Morganove financijske potpore Tesla je konačno bio prisiljen napustiti Wardencliff Tower projekt u ljeto 1905. godine uz prepljeni potpuni slom živaca. Presudom Vrhovnog suda od 21.06. 1943. godine Tesla je zapravo posthumno dobio priznanje da je otac radija.

Zašto onda Tesla nije uspio ostvariti bežični prijenos snage?

Kako je već istaknuto Tesla je imao periode velike energije i entuzijazma iza kojih su često slijedili ponori depresije. Bežični prijenos energije bio je Teslin istinski *raison d'etre* koji ga je nagonio da na neki način utisne svoju viziju u stvarni svijet. S wardencliff-om je unutarnja iluzija prevladala i Tesla je pretrpio teški živčani slom pošto nije bio u stanju obuhvatiti, a ni obuzdati rascijep koji je nastao između zamisli kako će njegov sustav raditi i načina na koji se Zemlja zaista ponašala u smislu medija za prijenos električne energije. Može se, zapravo, kazati da Tesla nije uspio staviti vlastitu imaginaciju pod kontrolu.

Je li nastupio razdor između izumitelja u Tesla koji se iznad svega uzdao u vlastitu

imaginaciju i inženjera, od kojeg se očekuje da se pouzda u rigorozno analitičko rasuđivanje zasnovano na znanstveno dokazanim činjenicama i matematičkim proračunima?

Tesla je smatrao kako stacionarni (stojni) valovi, za razliku od Hertzovih valova u zraku, ne gube energiju propagirajući se. Kako ih je detektirao na kratkim udaljenostima, Tesla je podrazumijevao da se na isti način ponašaju na proizvoljnoj udaljenosti. Također je bio uvjeren da se uz povratni val kroz atmosferu ostvaruje efikasni prijenos snage uz minimalne gubitke.

Na temelju takvih hipoteza Tesla je potom zaključio kako je ostvariv bežični prijenos energije do bilo koje točke na planetu i da daljnji eksperimenti i demonstracije nisu nužni.

Pritisnut velikom željom da uvjeri financijere kako je njegov sustav ispravan Tesla je tako, na žalost, propustio provesti testiranje svoje hipoteze na veće udaljenosti, što je zaista bio njegov ključni propust...

Štoviše, Tesla nije tražio dokaze koji bi opovrgli njegove pretpostavke o prijenosu snage i informacija stacionarnim valovima do kojih je došao eksperimentima u Colorado Springs-u. Propustio je jasno odrediti koliko daleko je moguće odaslati snagu kroz Zemlju bez značajnijih gubitaka. Iz današnje perspektive može se zaključiti kako su njegova velika nadanja, ali i mala količina podupirućih dokaza stvorili nerealnu sliku, gotovo iluziju u njegovom izumiteljskom umu. U svakom slučaju, za Teslu je tada nastupio trenutak kad je fenomene uočene u eksperimentima u Colorado Springs-u bilo nužno pretočiti u novi izum, a za to je trebao poslužiti toranj u Wardenclyffe-u.

U konačnici, Tesla je bio u krivu u pogledu pretpostavke da se Zemljom mogu odašiljati snaga i informacije. Tesla je pretpostavio da je moguć protok snage kroz Zemlju te da je ova snaga dostupna prijemnicima vjerujući da je unutrašnjost Zemlje nestlačiva poput fluida u kojem se valovi propagiraju naprijed-nazad uz zanemarive gubitke snage. Ali... Zemlja se ponašala poput ogromnog bazena s valovima koja se prigušuju i naposljetku nestaju. Drugim riječima, Zemlja se nije pokazala kao efikasan vodič elektriciteta.

Međutim, još jedna njegova zablude ukazuje na neke njegove dublje probleme... Pogrešna pretpostavka mu je bila što je smatrao da mu je za prijenos energije potreban zatvoreni strujni krug u nekom obliku, dok valovi za propagaciju ne trebaju zatvorene strujne krugove što govori o tome da nije bio sasvim saživljen s punim dostignućima elektromagnetske teorije svog vremena. Osim što nije uspio do kraja pojmiti elektromagnetsku teoriju, još od 1891. godine kad zapravo započinje možda i njegova najaktivnija faza Telsa je potpuno fokusiran na ideju prijenosa energije bez žica te nije zainteresiran za radio u smislu prijenosa informacija i u tom smislu radio čak smatra neperspektivnom tehnologijom. Umjesto toga, kako je već istaknuto, imao je viziju slanja valova kroz Zemlju koju želi zatitrati do njene rezonantne frekvencije da bi se krug zatvorio povratnom stazom kroz zrak.

Istina je kako je Tesla u Americi znanstvenom smislu, u ono vrijeme relativno sporog prijenosa informacija, bio relativno izoliran dok je sustavno znanje o elektromagnetizmu ipak bujalo na starom kontinentu u vidu radova Hertza, Heavisdea, Lorentza, Sommerfelda i mnogih drugih istraživača onog doba. Primjerice, ono što proizlazi iz teorije žičanih antena je da fenomen propagacije valova na niskim frekvencijama zahtjeva odašiljač ogromne duljine, dok s porastom frekvencije rastu i gubici, pa ova činjenica ostavlja malo prostora za razvoj onakvog koncepta bežičnog prijenosa kako danas izgleda da ga je na prijelazu stoljeća zamišljao Nikola Tesla.

Tako su oštrija stanovišta o stavovima i teorijama Nikole Tesle iznesena nedavno u [11]. Koristeći jezik filozofa znanosti Thomasa S. Kuhna A. D. Wunsch apostrofira Teslinu nespремnost da prihvati pomak paradigme u smislu *Hertzovih valova* i *Einsteinove teorije relativnosti*. Također, navodi Teslino nedovoljno poznavanje Maxwellove elektrodinamike i donekle izostanak poznavanja sofisticiranih matematičkih vještina te ističe da je Tesla previše “zaglibio” u primjeni električnih krugova za tumačenje fenomena u bežičnim komunikacijama [11].

Početkom 20. stoljeća propagaciju površinskih valova proučavao je i veliki njemački fizičar Arnold Sommerfeld. Danas je iz klasične elektromagnetske teorije poznato kako se bežična komunikacija može zasnivati na Zenneck-Sommerfeldovom rješenju Maxwellovih jednadžbi kojima se opisuje propagacija vala površinom zemlje.

Eksperimenti koje je Tesla zamislio na samom kraju 19. stoljeća nisu realizirani sve do šezdesetih godina 20. stoljeća kad je ustanovljeno da su rezonantne frekvencije Zemlje 8, 14 i 20Hz, dok je Tesla predvidio rezonancije na 6, 18 i 30Hz. Shumannove rezonancije inače se manifestiraju kao špicevi u spektru snage šuma ekstremno niskih frekvencija koje se propagiraju oko Zemlje.

*Prva definitivna opažanja ovih špiceva u spektru snage šuma načinjena su 1960., mada postoji dokaz da ih je Nikola Tesla možda opazio prije 1900.*

JOHN D. JACKSON

Svakako su interesantna Teslina razmišljanja o eksperimentalnim i teorijskim razmišljanjima u znanosti. Za Nikolu Teslu, kao i za velikog eksperimentalnog fizičara Michaela Faradaya, eksperiment je od suštinske važnosti za izvor novih znanstvenih spoznaja, a nikako ne predstavlja samo instrument potvrde teorijskih koncepta.

*Znanstvenici od Franklina do Morseja bili su jasni mislioci i nisu stvarali pogrešne teorije. Znanstvenici danas misle duboko umjesto jasno.*

*... Današnji znanstvenici zamjenili su eksperimente matematikom, a zatim lutaju od jednadžbe do jednadžbe, da bi na kraju izgradili strukturu koja nema vezosa stvarnošću*

NIKOLA TESLA

S druge strane je ipak poštivao rigorozni teorijski pristup, zasnovan na matematičkim modelima.

*Teško da postoji problem koji ne može biti matematički opisan tako da se efekt izračuna unaprijed, ili da se rezultati odrede unaprijed iz dostupnih teorijskih i praktičnih podataka.*

NIKOLA TESLA

Vrijedi se dotaknuti i njegovog odnosa prema poznatim suvremenicima. Tako je Jedan od kurioziteta u vezi Nikole Tesla to što nije bio poklonik teorije relativnosti, dok je Einstein je, s druge strane, Teslu smatrao uspješnim istraživačem u području struja visokih frekvencija.

*Njeni sljedbenici su briljantni ljudi, ali su prije poklonici metafizike, nego znanstvenici.*

NIKOLA TESLA

*Tesla je istaknuti pionir u području struja visokih frekvencija... Čestitam mu na velikim uspjesima njegovog životnog djela.*

ALBERT EINSTEIN

Na svojevrsan način postoje neke poveznice u životopisu Nikole Tesla i Alberta Einsteina [6]. Naime, eksperimentirajući u Colorado Springsu Tesla je došao do zaključka kako se kroz Zemlju šire stojni valovi pa je do kraja života pobijao primjenu radio prijenosa Hertzovim valovima koji se šire u slobodnom prostoru. Nekako slično tome, Einstein je uporno odbijao prihvatiti eliminaciju objektivnog promatrača u kvantnoj fizici i čvrsto je do kraja života vjerovao u realnost neovisnu od promatrača.

Postoje još neke sličnosti u njihovim karijerama. Tesla je bio priznat zbog svog polifaznog sustava i prijenosa energije izmjeničnim strujama niskih frekvencija žicama, ali je potpuno odbačena njegova ideja o bežičnom prijenosu snage u koju je čvrsto vjerovao do kraja života. Einstein pak, slavljen zbog svoje teorije relativnosti ostaje usamljeni oponent kvantne fizike, koji je bezuspješno tražio ujedinjenu teoriju polja, također do kraja života. Ipak, Einstein je tih tridesetak godina svog života proveo na prestižnom Princeton-u i u javnosti ostao percipiran kao jedan od najvećih

znanstvenika koji je ikad živio. Tesla je, međutim, umro zaboravljen i sam u sobi njujorkškog hotela.

Po svom profilu, Tesla je u punom smislu riječi vizionar, entuzijast, eksperimentalni znanstvenik prije vođen nadahnućem, i čistom intuicijom, negoli rigoroznim teorijskim konceptima. Ponekad je svoju intuiciju stavljao čak i ispred samog eksperimenta.

*Nisam trebao ni modele ni crteže, ili eksperimente. Sve sam mogao naslikati u svom umu.*

NIKOLA TESLA

Da ne bude zabune, neovisno o propalom i promašenom konceptu bežičnog prijenosa snage, Nikola Tesla, čovjek koji je osmislio indukcijski motor šetajući parkom i recitirajući Goetheovog Fausta, trajno ostaje moj znanstveni heroj, izumitelj s vizijom budućnosti...

*...Bit će moguće da poslovni čovjek u New Yorku izdiktira poruku i da se ona trenutno pojavi u njegovom uredu u Londonu ili drugdje. Taj isti čovjek moći će iz svog ureda nazvati bilo kojeg telefonskog pretplatnika na planetu, bez mijenjanja postojeće opreme.*

*Jeftini instrument, ne veći od sata, omogućit će njegovom vlasniku da čuje svugdje, na moru i kopnu, glazbu ili pjesmu, nastup političkih vođa, govor eminentnih znanstvenika, ili propovijed svećenika, izrečene na nakon drugom mjestu, bez obzira na udaljenost.*

*Na isti način, bilo koja slika, znak, crtež ili tisak može se prenijeti s jednog mjesta na drugo. Milijunima takvih uređaja moglo bi se upravljati s jednog mjesta, poput ovog.*

*Međutim, najvažniji od svega, bit će prijenos električne energije, bez žica, koji će donijeti potvrdu svega.*

NIKOLA TESLA

Prije više od stotinu godina imao je viziju prijenosnog uređaja koji bi mogao povezati ljude širom globusa sa slikama, glasom, glazbom i informacijama. Danas takav uređaj držimo u našim rukama i zovemo ga pametnim telefonom. Nikola Tesla je bio svjestan da ga njegovi suvremenici neće razumjeti.

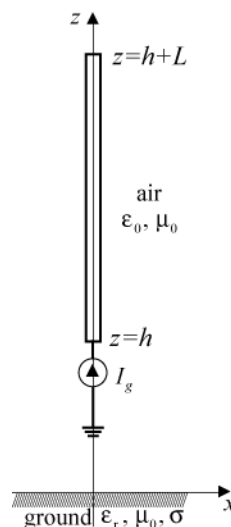
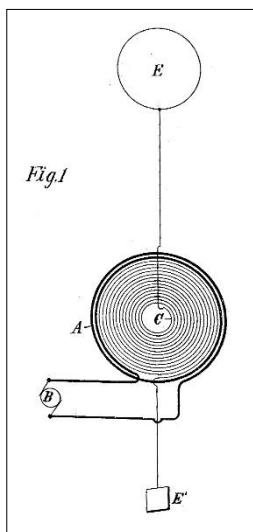
*Sadašnjost je njihova, budućnost za koju ja zaista radim, je moja.*

NIKOLA TESLA

Svjetska mreža o kojoj je sanjao veliki vizionar danas je stvarnost. Jedini neostvareni san genijalnog izumitelja ostao je onaj o bežičnom prijenosu energije, kojim je ovaj izraziti humanist želio čovječanstvu podariti blagostanje i trajni mir.

### 3. Modeliranje Teslinog odašiljača primjenom teorije antena

U ovom odjeljku analizira se Teslin odašiljač primjenom teorije antena. Na slikama 5a i 5b prikazan je Teslin odašiljač i pripadna reprezentacija u vidu ekvivalentne idealno vodljive monopol antene duljine  $L$ , radijusa  $a$ , postavljene vertikalno na visini  $h=25\text{m}$  iznad konačno vodljive zemlje. Dimenzije antene ( $L=65\text{m}$ ,  $a=10\text{cm}$ ) zadovoljavaju aproksimaciju tanke žice [12] te se uzima u obzir ovisnost samo o  $z$  varijabli.



- a) Shema Teslinog odašiljača      b) Ekvivalentna monopol antena iznad zemlje  
Sl. 4:– Reprezentacija Teslinog odašiljača pomoću monopol antene vertikalno postavljene iznad konačno vodljive zemlje

Vertikalni monopol napajan je idealnim strujnim izvorom iznosa  $I_g$ , koji predstavlja struju induciranu na ulazu sekundara uslijed oscilacija na primaru transformatora.

#### 3.1 Integralna jednadžba za struju uzduž vertikalnog monopola

Temeljni korak u matematičkom modelu je određivanje raspodjele struje koja se inducira uzduž monopola uslijed vremenski-harmonijske pobude strujnim izvorom. Ova raspodjela struje dobiva se rješavanjem homogene Pocklingtonove integro-diferencijalne jednadžbe koja se daje izvesti tako da se električno polje izrazi pomoću magnetskog vektorskog potencijala te zadovoljavanjem uvjeta kontinuiteta za tangencijalne komponente polja na idealno vodljivoj površini antene.



Kako za idealno vodljivu žicu totalno tangencijalno polje iščezava na površini vrijedi

$$\vec{e}_x (\vec{E}^{inc} + \vec{E}^{sct}) = 0 \quad (1)$$

gdje je  $E^{inc}$  upadno polje, a  $E^{sct}$  raspršno polje.

Polazeći od Maxwellovih jednažbi te baždarnog uvjeta za magnetski vektorski potencijal i električni skalarni potencijal

$$\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

električno polje da se izraziti na način:

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon_0} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A} \quad (3)$$

Uslijed rotacijske simetrije postoje sljedeće komponente polja:

$$E_\rho = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \quad (4)$$

$$E_z = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} - j\omega A_z \quad (5)$$

Aksijalna komponenta magnetskog vektorskog potencijala može se izraziti preko partikularnog integrala [13]

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_h^{h+L} g(x, z, z') I(z') dz' \quad (6)$$

gdje je  $I(z')$  nepoznata raspodjela struje uzduž vertikalnog monopola, pri čemu je  $g(x, z, z')$  totalna Greenova funkcija oblika:

$$g(x, z, z') = g_0(x, z, z') + R_{TM} g_i(x, z, z') \quad (7)$$

a Green-ova funkcija slobodnog prostora oblika

$$g_0(x, z, z') = \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (8)$$

dok je Green-ova funkcija koja proizlazi iz teorije preslikavanja, odnosno postojanja preslikane antene dana izrazom

$$g_i(x, z, z') = \frac{e^{-jkR^*}}{R^*} \quad (9)$$

gdje je  $R$  udaljenost od točke izvora na vertikalnom monopolu u zraku do proizvoljne točke promatranja u zraku, dok je  $R^*$  udaljenost od točke izvora na

preslikanoj žici do proizvoljne točke promatranja u slobodnom, prostoru. Utjecaj zemlje uzima se u obzir preko koeficijenta refleksije za transversalno magnetsku (TM) polarizaciju  $R_{TM}$

$$R_{TM} = \frac{\underline{n} - \sqrt{\underline{n}}}{\underline{n} + \sqrt{\underline{n}}} \quad (10)$$

pri čemu je  $\underline{n}$  indeks loma:

$$\underline{n} = \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_0} \quad (11)$$

a  $\varepsilon_{eff}$  je kompleksna dielektričnost zemlje

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r \varepsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

gdje su  $\varepsilon_r$  i  $\sigma$  permitivnost, odnosno vodljivost sredine.

Kako totalno tangencijalno električno polje na idealno vodljivoj žici iščezava, uvjet na granici postaje

$$E_z^{exc}(a, z) + E_z^{sct}(a, z) = 0 \quad (13)$$

gdje  $E_z^{exc}$  označava funkciju pobude, a  $E_z^{sct}$  je raspršno polje, pri čemu su obje komponente polja tangencijalne na žicu.

Kombiniranjem jednadžbi (1)-(13) dobiva se Pocklingtona integro-diferencijalna jednadžba za vertikalnu žicu iznad zemlje

$$E_z^{exc} = -\frac{1}{j4\pi\omega\varepsilon_0} \int_h^{h+L} \left[ \frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k^2 \right] g(z, z') I(z') dz' \quad (14)$$

Konačno, u analizi Teslinog odašiljača, funkcija pobude nije izražena u obliku upadnog električnog polja, pošto ekvivalentna antena nije pobuđena ravnim valom ni naponskim generatorom, pa lijeva strana jednadžbe (14) iščezava, odnosno dobiva se homogena integro-diferencijalna jednadžba oblika

$$\int_h^{h+L} \left[ \frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k^2 \right] g(z, z') I(z') dz' = 0 \quad (15)$$

Vertikalna monopol antena pobuđena je idealnim strujnim izvorom pri čemu je jedna strezaljka priključena na antenu, a za drugu se pretpostavlja da je uzemljena u udaljenoj točki, slika 2b. Vrijedi napomenuti da se sličan pristup koristi se i u tranzijentnoj analizi uzemljivačkih sustava [13].

Ovakav oblik pobude daje se uključiti u integralnu formulaciju problema

u vidu prisilnih rubnih uvjeta koji se primjenjuju na krajevima žice:

$$I(0) = I_g \quad (16a)$$

$$I(L) = 0 \quad (16b)$$

gdje  $I_g$  predstavlja narinuti strujni izvor.

Integralno-diferencijalna jednačba (15) sadrži kvazi-singularnu jezgru uslijed postojanja diferencijalnog operatora [12]. Integralna jednačba (15) uz pridruženi set rubnih uvjeta (16) rješava se numerički primjenom metode rubnih elemenata. Matematički detalji prelaze okvire ovog rada, a dostupni su u drugim publikacijama autora, primjerice [12-17].

Rješavanjem homogene Pocklington-ove jednačbe dobiva se raspodjela struje uzduž vertikalnog monopola.

### 3.2 Integralne formule za proračun električnog polja

Jednom kad je poznata raspodjela struje moguće je odrediti sve komponente izračenog električnog polja.

Uvrštavajući partikularni integral za vektorski potencijal (6) u (4) daje radijalnu komponentu polja

$$E_\rho = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0} \int_h^{h+L} I(z') \frac{\partial^2 g(z, z', \rho)}{\partial \rho \partial z} dz' \quad (17)$$

koja se, uz primjenu parcijalne integracije, može preurediti na način

$$E_\rho = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \int_h^{h+L} \frac{\partial I(z')}{\partial z'} \frac{\partial g_0(z, z', \rho)}{\partial \rho} dz' - \int_h^{h+L} \frac{\partial I(z')}{\partial z'} R_{TM} \frac{\partial g_i(z, z', \rho)}{\partial \rho} dz' \right] \quad (18)$$

Zbog nižeg reda derivacije oblik (18) pogodniji je za numeričko rješavanje od izraza (17).

Uvrštavanjem (69 u 83) aksijalna komponenta električnog polja poprima oblik

$$E_z = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0} \int_h^{h+L} \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] g(z, z', \rho) I(z') dz' \quad (19)$$

Primjenom parcijalne integracije jednačba (19) postaje

$$E_z = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \int_h^{h+L} \frac{\partial I(z')}{\partial z'} \frac{\partial g_0(z, z', \rho)}{\partial z} dz' - \int_h^{h+L} \frac{\partial I(z')}{\partial z'} R_{TM} \frac{\partial g_i(z, z', \rho)}{\partial z} dz' + k^2 \int_h^{h+L} I(z') g(z, z', \rho) dz' \right] \quad (20)$$

Integrali koji se pojavljuju u relacijama (18) i (20) sadrže kvazisingularne jezgre uslijed postojanja diferencijalnog operatora [17]. Ova kvazisingularnost daje se efikasno riješiti kombinacijom rubnih elemenata i konačnih diferencija [17].

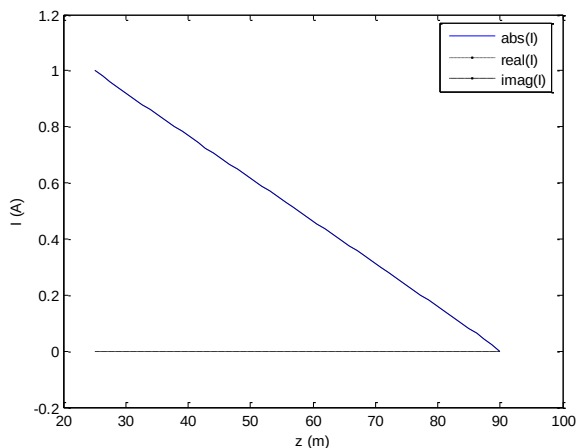
Također, vrijedi naglasiti da se postojeći model može dodatno unaprijediti ukoliko se utjecaj zemlje izrazi preko rigoroznog Sommerfeldovog integralnog pristupa umjesto primjenom pojednostavljenog Fresnel-ovog koeficijenta refleksije opisanog u ovom odjeljku.

### 3.3 Numerički rezultati

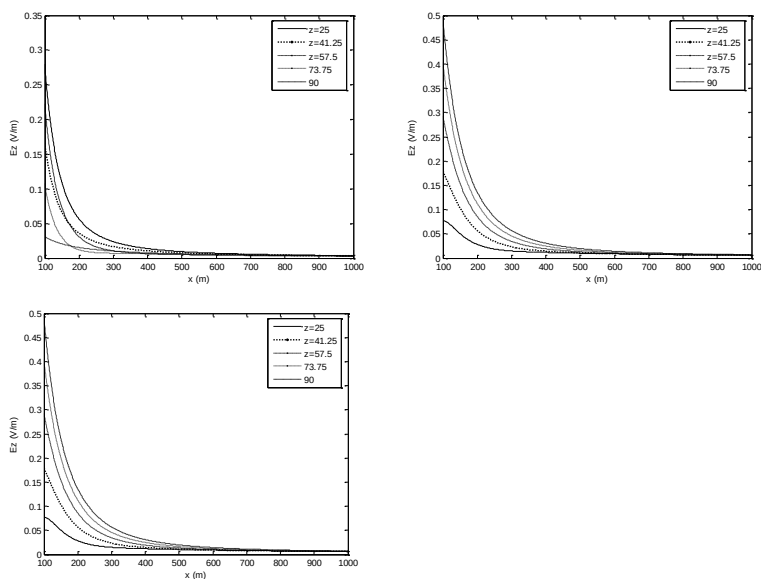
Analiza zračenja vertikalnog monopola koji predstavlja Telsin odašiljač provedena je na radnoj frekvenciji  $f=150\text{kHz}$ . Pretpostavlja se da je antenna pobuđena jediničnom strujom oblika

$$I_g = 1e^{j0} \quad (21)$$

Na slici 6 prikazana je raspodjela struje uzduž vertikalne monopol antene, dok je na slici 7 prikazano tangencijalno polje koje zrači monopol za tri različita scenarija; antena u slobodnom prostoru, antenna iznad idealno vodljive zemlje i antenna iznad konačno vodljivog poluprostora. Struja koja se inducira na vertikalnom monopolu pokazuje karakter trokutne raspodjele koja iščezava na kraju žice zadovoljavajući tako zahtjeve koje propisuje aproksimacija tanke žice [17].



Sl. 6: Raspodjela struje inducirana duž vertikalnog monopola



a) Monopol u slobodnom prostoru b) Monopol iznad idealno vodljive zemlje c) Monopol iznad konačno vodljive zemlje

Sl. 7: Električno polje na različitim visinama iznad zemlje

Analizom rezultata prikazanih na slici 7 za sva tri scenarija vidljivo je rapidno opadanje z-komponente električnog polja (koja je značajna za zračenje antene) s udaljenošću. Ovakvi rezultati za izračeno polje ukazuju kako ne dolazi do značajnijeg “Hertzianskog” zračenja u Teslinom odašiljačkom sustavu, odnosno ne dolazi do značajnijeg transporta elektromagnetske energije s ove zračee konfiguracije u slobodni proctor [14,15].

Vrlo sličan zaključak apostrofiran je u radu [18] u kojem je korišten model preko prijenosnih linija (TL model).

Može se dakle ustvrditi da Nikola Tesla, prilikom projektiranja svog odašiljača, nije razmatrao propagacijski mehanizam kojeg je postavio Heinrich Rudolph Hertz.

U okviru današnjih spoznaja uglavnom se razmatra prijenos snage na male udaljenosti. U tom smislu na efikasnost prijenosa snage najviše utjecaja imaju parametri odašiljača i prijemnika koji se odnose na Q-faktor i rezonantnu frekvenciju konfiguracije. U odnosu na pionirske dane Nikole Tesle danas je poznato da bežični prijenos snage može biti zračeećeg ili ne-zračeećeg karaktera, ovisno o mehanizmu prijenosa energije. Prijenos snage zračenjem može se realizirati korištenjem antene koja emitira elektromagnetski val koji se širi kroz slobodni prostor na velike udaljenosti. Međutim, s obzirom na raspršenost ovakve emisije u raznim smjerovima efikasnost prijenosa snage je vrlo niska. Ne-zračeeći prijenos snage zasniva se na magnetskoj sprezi u bliskom polju i daje se

kategorizirati kao prijenos na vrlo kratke udaljenosti [19].

#### 4. Analiza Teslinog koncepta propagacije primjenom teorije antena

U ovom odjeljku izložena je analiza Teslinog kanala propagacije primjenom teorije antena i teorije prijenosnih linija u skladu s rezultatima objavljenim u [16].

Teslin koncept propagacije zasniva se na pretpostavci o preraspodjeli naboja uzduž globusa [18], u okviru kojeg struja kroz Zemlju pogonjena Teslinim odašiljačem penetrira u Zemlju i teče uzduž dijametra zemljinog promjera [16], [18].

Uz pretpostavku da struja teče uzduž promjera Zemlje napon  $V(x)$  i struja  $I(x)$  u skladu s teorijom prijenosnih linija su dani izrazima [16]:

$$V(x) = I_0 Z_0 \frac{ch\gamma_e(L-x)}{ch\gamma_e L} \quad (22)$$

$$I(x) = I_0 \frac{sh\gamma_e(L-x)}{sh\gamma_e L} \quad (23)$$

gdje je  $L$  promjer Zemlje izražen u valnim duljinama, a

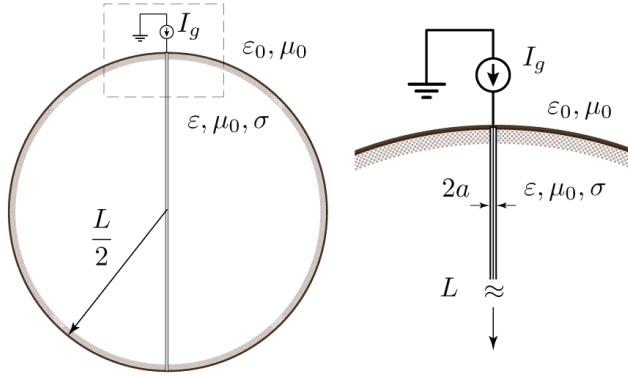
$\gamma_e = \alpha_e + j\beta_e$  je kompleksna konstanta propagacije Zemlje, a  $Z_0$  je odgovarajuća karakteristična impedancija.

Veličina  $I_0$  je struja koju proizvodi Teslin odašiljač te koja prodire u Zemlju. Pretpostavlja se postojanje stojnih valova struje i napona na površini Zemlje [16].

Energija takvog sustava, prema Tesli se ne transportira dalje od izvora već prije ostaje konzervirana u sustavu Teslin odašiljač-Zemlja te se može apsorbirati preko ispravno podešenih prijemnih antena [3-4], [10].

Uzimajući u obzir da gubici na propagacijskoj stazi rastu s frekvencijom uslijed konačne vodljivosti Zemlje, proizlazi da je korištenje nižih frekvencija ( $< 20$  kHz [18]) nužno za prijenos snage, što je Tesla naslućivao za vrijeme svojih eksperimenata u Colorado Springs-u [2].

Antenski model Teslinog propagacijskog koncepta zasniva se na ekvivalentnom vodiču koji predstavlja stazu kojom se propagira *Teslin val* kroz Zemlju. Na slici 8 prikazan je nadomjesni ravni vodič duljine  $L$ , radijusa  $a$ , uronjen u medij s gubicima i pobuđen ekvivalentnim strujnim izvorom.



Sl. 8: Ekvivalentni ravni vodič napajan idealnim strujnim izvorom iznosa  $I_g$

I u ovom slučaju, kao u modelu izloženom u 2. odjeljku pretpostavka je da je žica, koja se nalazi u neograničenom mediju s gubicima konačne vodljivosti, vrlo dobar vodič te da je zadovoljena tankožičana aproksimacija [16].

#### 4. 1. Integro-diferencijalna jednadžba za struju uzduž vodiča

Kao i u odjeljku 4 odgovarajuća integro-diferencijalna jednadžba za struju koja se inducira po žici može se izvesti zadovoljavanjem uvjeta kontinuiteta za tangencijalne komponente električnog polja uzduž žice. Ukupno polje tangencijalno na žicu sastoji se od upadnog polja  $\vec{E}^{inc}$  i raspršnog polja  $\vec{E}^{sct}$  te za idealno vodljivu žicu iščezava na površini, tj. može se pisati [17]

$$\vec{e}_x (\vec{E}^{inc} + \vec{E}^{sct}) = 0 \quad (24)$$

Raspršno polje daje se izraziti preko vektorskog potencijala  $\vec{A}$  i skalarnog potencijala  $\varphi$ , a u skladu s tankožičanom aproksimacijom [12], [17] samo aksijalna komponenta vektorskog potencijala postoji pa slijedi

$$E_x^{sct} = -j\omega A_x - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (25)$$

gdje su vektorski i skalarni potencijali dani izrazima:

$$A_x = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') g(x, x') dx' \quad (26)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_{eff}} \int_0^L q(x') g(x, x') dx' \quad (27)$$

pri čemu je  $q(x')$  raspodjela linijskog naboja, a  $I(x')$  je raspodjela struje koja se inducira uzduž vodiča.

Green-ova funkcija medija s gubicima je oblika

$$g_0(x, x') = \frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1} \quad (28)$$

a konstanta propagacije konačno vodljive sredine je

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon} \quad (29)$$

dok je  $R$  je udaljenost od točke izvora do točke promatranja.

Linijska gustoća naboja i raspodjela struje duž žice povezani su preko jednodimenzionalne varijante jednadžbe kontinuiteta

$$q = -\frac{1}{j\omega} \frac{dI}{dx} \quad (30)$$

Uvrštavanjem (30) u (27) daje

$$\phi(x) = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' \quad (31)$$

pa supstitucija (26) i (31) u (25) rezultira u sljedećem integralnom izrazu za raspršno električno polje

$$E_x^{sct} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') g(x, x') dx' + \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' \quad (32)$$

Konačno, za slučaj pobude strujnim izvorom slijedi [13], [16]

$$E_x^{exc} = 0 \quad (33)$$

Kombiniranjem jednadžbi (24), (32) i (33) dobiva se homogena integro-diferencijalna jednadžba Pocklingtonovog tipa za raspodjelu struje uzduž vodiča:

$$j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') g(x, x') dx' - \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' = 0 \quad (34)$$



Poznavanje struje duž žice omogućava određivanje raspršnog napona.

#### 4.2. Raspršni napon duž žice

Raspršni napon uzduž vodiča definiran je linijskim integralom vertikalne komponente raspršnog polja od udaljene referentne točke do površine vodiča [16]

$$V^{sct}(x) = - \int_{-\infty}^a E_z^{sct}(x, z) dz \quad (35)$$

Pošto se vertikalna komponenta polja može izraziti preko gradijenta skalarnog potencijala

$$E_z^{sct} = - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (36)$$

raspršni napon je onda

$$V^{sct}(x) = \int_{-\infty}^a \frac{\partial \varphi}{\partial z} dz = \frac{d}{dz} \int_{-\infty}^a \varphi(x, z) dz \quad (37)$$

Uz pretpostavku da je u udaljenoj referentnoj točki skalarni potencijal nula [16] te koristeći relaciju (31) slijedi završni izraz prostornu raspodjelu raspršnog napona uzduž vodiča

$$V^{sct}(x) = - \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' \quad (38)$$

Jednom kad se odredi raspodjela struje  $I(x)$  izraz (38) rješava se numeričkom integracijom.

#### 4.3. Snaga generirana na vodiču

Na temelju poznatih raspodjela vršnih vrijednosti struje i napona uzduž vodiča snaga koju generira ovakav sustav može se odrediti primjenom poznate relacije iz teorije krugova

$$P(x) = \frac{1}{2} \text{Re} \left[ V(x) I(x)^* \right] \quad (39)$$

gdje zvjezdica označava konjugirano-kompleksnu veličinu.

#### 5.4. Proračun raspršnog napona i snage

Integralna jednadžba (34) uz određene aproksimacije može se riješiti i analitički [12-13], [17]. Stoga, ukoliko se integro-diferencijalna jednadžba (34) napiše na način:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \gamma^2 \right] \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' = 0 \quad (40)$$

te usvajajući niz određenih aproksimacija [16], analitičko rješenje jednadžbe (40) je tada oblika

$$I(x) = I_g \frac{sh\gamma(L-x)}{sh\gamma L} \quad (41)$$

Približno rješenje integro-diferencijalne jednadžbe (40) je očito ekvivalentno izrazu koji se dobije primjenom teorije prijenosnih linija (23).

Raspršni napon uzduž vodiča je tada izražen integralom:

$$V^{sct}(x) = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' = \frac{\gamma I_g}{j4\pi\omega\epsilon_{eff} sh\gamma L} \int_0^L ch\gamma(L-x) g(x, x') dx' \quad (42)$$

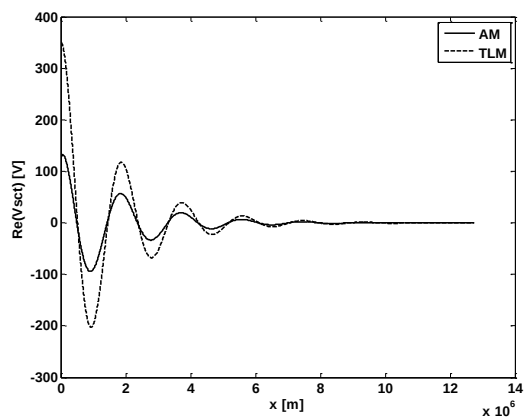
A u skladu s jednadžbom (39) snaga generirana uzduž vodiča je konačno:

$$P(x) = \frac{\gamma I_g sh\gamma(L-x)}{j4\pi\omega\epsilon_{eff} sh^2\gamma L} \int_0^L ch\gamma(L-x) g(x, x') dx' \quad (43)$$

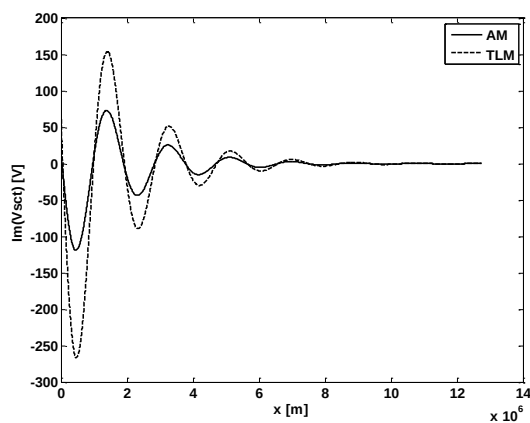
U relacijama (42) i (43) primjenjuje se numerička integracija.

#### 4.5. Računalni primjer

U okviru računalnog primjera razmatra se ekvivalentni vodič (koji reprezentira Teslinu stazu propagacije kroz Zemlju) dimenzija:  $a=5$  cm,  $L=12732$  km,  $\epsilon_r=10$ ,  $\sigma=10^{-8}$  S/m,  $f=50$  Hz. Vrijedi istaknuti da se u ovom primjeru uzima vrlo niska vodljivost Zemlje. Dobiveni rezultati za realni i imaginarni dio raspršnog napona prikazani su na slici 9.



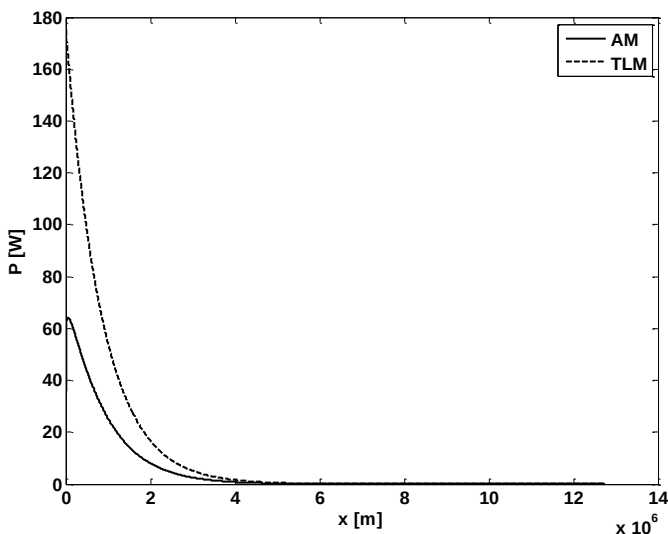
a) Realni dio



b) imaginarni dio

Sl. 9: Raspršni napon duž vodiča

Valni oblici, uz određena očekivana odstupanja u amplitudu, s obzirom na razlike u metodama, su usporedivi. Slika 10 prikazuje snagu generiranu u sustavu.



Sl. 10: Snaga generirana uzduž ekvivalentnog vodiča

Očito je iz slika 9 i 10 da za oba modela čak i za izrazito nisku vodljivost medija snaga rapidno opada s udaljenošću od izvora (odašiljača). Shodno očekivanju, atenuacija je izražena za antenski model.

Suprotno Teslinom predviđanju, uzimajući u obzir opće prihvaćene propagacijske mehanizme, čak i na ekstremno niskim frekvencijama ne dolazi do značajnog transfera snage kroz Zemlju.

Dakle, osnovno pitanje u ovako zamišljenom konceptu propagacije je bilo kako Zemlja zaista reagira kad se u nju 'upumpa' električna energija. Tesla je, zapravo, smatrao da se Zemlja ponaša 'nestlačivo' poput fluida, odnosno poput balona ispunjenog vodom, koji titra na nekoj rezonantnoj frekvenciji. Očito nije sagledao suprotan odgovor da se Zemlja ponaša 'stlačivo.' Naime, u ovom drugom slučaju, Tesla je mogao „upumpavati“ električnu energiju u Zemlju i stvoriti električne oscilacije, ali u konačnici takvi valovi bi se daleko od izvora atenuirali i naposljetku iščezli. Kao ilustracija, može se razmatrati kamen bačen na obali mora. Na samom početku stvaraju se valovi koji ubrzo iščezavaju i ne stižu do neke druge, udaljene obale. Ponašanje Zemlje je očito puno više nalik na ponašanje udaljenih morskih obala nego na balon ispunjen vodom.

Postoje, doduše, neka razmišljanja da se kod Maxwellovih jednadžbi stvaraju i longitudinalni (skalarni) valovi koji se ne disipiraju već putuju „brže od svjetlosti.“ Međutim, većina fizičara smatra skalarne valove eksperimentalno nedokazivima i nisu dio službeno prihvaćene paradigme.

U svakom slučaju, korištenje Zemlje za bežični prijenos energije nevjerovatno je

smiona ideja Nikole Tesle. Na žalost, jako je malo znanstvene literature koja bi eventualno podržala Teslin stav o prijenosu snage kroz Zemlju. Rekonstrukcija njegovih patenata svjedoči jedino o prijenosu snage spregom odašiljača i prijemnika na malim udaljenostima [20].

Treba naglasiti i kako je Tesla bio čovjek patenata, više nego znanstvenih publikacija, a ostavio ih je gotovo 300 iza sebe. Izvedbu svog sustava za bežični prijenos snage objavio je 1904. godine [21], dok je praktičnu izvedbu opisao je u svom patentu iz 1914. [22].

Neovisno o činjenici da nije ostvario bežični prijenos snage na velike udaljenosti Tesla je niz godina neumorno pisao o svojim idejama [23-27].

Primjene WPT tehnologije danas idu od bežičnog napajanja elektroničkih uređaja do promišljanja grandioznih projekata kakav je SPS [8].

Teslin san o bežičnom prijenosu energije traje već oko 130 godina, dok je ideja o prijenosu solarne energije stara nešto više od pola stoljeća. Do danas, izvedivost bežičnog prijenosa energije ostaje reducirana na kratke udaljenosti i nižeg ranga što se tiče iznosa prenesene snage [28]. Gotovo da nema suvremenog znanstvenog rada na području bežičnog prijenosa snage koji u svom uvodu ne navodi da se radi o pionirskoj ideji Nikole Tesle.

## **Zaključna razmatranja**

Prije 165 godina rođen je izumitelj i vizionar Nikola Tesla bez čijih pronalazaka svjetski raširena elektrifikacija koja je do neprepoznatljivosti unaprijedila život većine ljudi na planetu ne bi bila moguća.

Na prijelazu 19. u 20. stoljeće Nikola Tesla provodio je svoje eksperimente na prijenosu snage putem radio valova. Kao već dokazani izumitelj u području generiranja i prijenosa energije na ekstremno niskim frekvencijama žicama čvrsto je vjerovao kako je uz prijenos komunikacijskih signala vrlo blizu realizacije bežičnog prijenosa snage svojim *Svjetskim sustavom*. Primjenom svog odašiljača i izmjeničnih struja Tesla se nadao kako će proizvesti oscilacije električne energije uzduž globusa te tako generirati stojne valove u koje će onda moći „uroniti“ prijemne antene na optimalnim lokacijama i tako prenijeti snagu na aproizvoljnu udaljenost. Proučavajući tako razne aspekte fenomena rezonancije tražio je mogućnost primjene prijenosa električne energije na veliku udaljenost bez žica. Godine 1891. počinje njegova možda i najaktivnija faza, ali u svojoj grandioznoj ideji prijenosa energije bez žica nije uspio na pravi način pojmiti elektromagnetsku teoriju i smatrao je, da u tehnološkom smislu, radio nije imao perspektivu. Umjesto toga imao je viziju slanja valova kroz Zemlju da bi se strujni krug zatvorio povratnom stazom kroz zrak.

Nikada nije uspio osigurati novcana sredstva za razradu svoje ideje i, u konačnici,

nije uspio ostvariti svoj cilj.

*Električna snaga koja teče iz naših velikih generatora, osvijetljavajući naše velike gradove, rastjerujući crninu noći, i telekomunikacije koje sjedinjuju domove i radna mjesta naše civilizacije, preko kontinenata, oko globusa i kroz udaljene točke prostora – sve su ovo spomenici koji svjedoče o uspješnom životu ovog malo poznatog, ali jedinstvenog, znanstvenika, izumitelja, inženjera, futurista i građanina svijeta..*

JAMES CORUM

U ovom radu posvećenom obljetnici rođenja velikog izumitelja provedena je i analiza Teslinog odašiljača i koncepta propagacije valova kroz Zemlju. Dobiveni rezultati ukazuju da, na temelju opće prihvaćenih principa klasične elektromagnetske teorije bežični prijenos snage kroz Zemlju, onako kako ga je osmislio Nikola Tesla nije moguć.

U svakom slučaju nepobitne povijesne činjenice ukazuju da je bežični prijenos snage, barem u smislu koncepta, njegova zamisao.

Tesla je jednom čovječanstvo opskrbio energijom svojim polifaznim sustavom na niskim frekvencijama koristeći žice, drugi put je bežičnim prijenosom želio ljudskom društvu podariti još veću dobrobit, praktično besplatnu energiju u velikim količinama, ali nije uspio...

Tesla se jednostavno nije mogao zaustaviti samo na prijenosu informacija, grandiozna vizija koja ga je nosila bila je puno jača od njega.

*S najdubljim divljenjem možemo sagledavati kako je Tesla mogao ostvariti tako velike uspjehe.*

NIELS BOHR

Zimskog dana prije nešto više od 78 godina, u hotelskoj sobi u New Yorku u krajnjem je siromaštvu sam i zaboravljen umro čovjek koji je desetljećima ranije šetajući parkom i recitirajući Goethe-ovog Fausta osmislio indukcijski motor – uređaj koji je zauvijek promijenio civilizaciju.

Njegova ideja o bežičnom prijenosu snage živi i dalje.

## Literatura

- [1] Y. Ron Hui, Past, Present and Future Trends of Non-Radiative Wireless Power Transfer, CPSS Trans on Power Electronics and Applications, Vol. 1, No 1, Dec. 2016, pp. 83-91.N.

- [2] N. Tesla, *Colorado Springs Notes 1899-1900*, A. Marinčić, ed, Nolit, Beograd, Yugoslavia, 1978.
- [3] A. Marinčić: Research of Nikola Tesla in Long Island laboratory. In: *Energy and Development at the International Scientific Conference in Honor of the 130<sup>th</sup> Anniversary of the Birth of Nikola Tesla*, 1986.
- [4] R. Munson, *Tesla Inventor of Modern*, W.W. Norton & Company, New York, 2018.
- [5] "Six Great Pioneers of Wireless", EBU Technical Review, Spring 1995., pp. 82-96
- [6] D. Poljak, Bežični prijenos energije: neostvareni san Nikole Tesle, Ei, Stručni časopis za elektrotehniku i elektroenergetiku, pp. 85-91, No 3, srpanj 2011.
- [7] N. Tesla, "My Inventions. V. The Magnifying Transmitter", *El. Experimenter*, June, 1919, pp. 112-113, 148, 173, 176-178.
- [8] Q. Chen et al., Antenna Characterization for Wireless Power-Transmission system Using Near-Field Coupling, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 54, No 4, August 2012., pp. 108-116.
- [9] W. C. Brown: The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-32, No. 9, Sept. 1984, pp. 1230-1242.
- [10] A. Marinčić, "Some recent Recognition of Pioneering Role of Nikola Tesla in the Development of Radio", *Proc. International Scien. And Prof. Meeting: The Life and Work of Nikola Tesla*, June 28-29, 2006, pp. 32-48.
- [11] D. Wunsch, Nikola Tesla's True Wireless: A Paradigm Missed, *Proc. Of the IEEE*, Vol.106., No 6, June 2018, pp. 1115-1123.
- [12] D. Poljak, *Advanced Modeling in Computational EMC*, John Wiley and Sons, New York, 2007.
- [13] D. Poljak, S. Sesnić, R. Goic, Analytical versus boundary element modelling of horizontal ground electrode. *Engineering analysis with boundary elements*. 34 (2010), 4; 307-314.
- [14] D. Poljak, Z. Blažević, V. Dorić, Modeling of Tesla's using the Antenna Theory Approach, Annual 2006 of the Croatian Academy of Engineering, pp. 191-205, 2006.
- [15] D. Poljak, D. Čavka, Z. Blažević, Modeling of Tesla's Transmitter using the Wire Antenna Theory with Ground Effects Included, Proceedings of 2008 International Conference on Software, Telecommunications and Computer., 2008.
- [16] D. Poljak et al. Full Wave Model versus Transmission Line Representation of Tesla's Wave Propagation: 155th Anniversary of Birth of Nikola Tesla, SoftCOM 2011
- [17] D. Poljak, K. El Khamlichi Drissi, Computational Methods in Electromagnetic Compatibility, Antenna Theory Approach versus Transmission Line Methods, John Wiley and Sons, New Jersey, 2018.
- [18] Z. Blažević, D. Poljak, Some Notes on Transmission Line Representations of Tesla's Transmitters, SoftCOM 2008.
- [19] C.K. Lee, W.X. Zhong, S.Y.R. Hui, Recent Progress in Mid-Range WireLess Power Transfer, The 4<sup>th</sup> Annual Enrgy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012, Raleigh, NC, Sept. 2012.
- [20] C.W. Van Neste et al., Electrical Excitation of the Local Earth for Resonant, Wireless Energy Transfer, *Wireless Power Transfer*, 2016, 3, (2), pp.117-125.
- [21] N. Tesla: The Transmission of Electrical Energy Without Wires. *Electrical World and Engineer*, March 5, 1904.

- [22] N. Tesla, US Patent No 1, 119,732, 1914.
- [23] N. Tesla: The problem of increasing human energy, *The Century Illustrated Monthly Magazine*, June 1900.
- [24] N. Tesla, *Art of Transmitting Electrical Energy Through the Natural Mediums*, Specification forming part of Patent No. 787,412, United States Patent Office, April 18, 1905.
- [25] N. Tesla, *Apparatus for Transmitting Electrical Energy*, Patent No. 1,119,732, United States Patent Office, December 1, 1914.
- [26] N. Tesla, "The True Wireless", *Electrical Experimenter*, May 1919, pp. 28-30, 61-63, 87.
- [27] N. Tesla, "World System of Wireless Transmission of Energy", *Telegraph and Telephone Age*, October 16, 1927, pp. 457-460.
- [28] J.P. Fanton, Wireless Power Transmission: State of the Art and Perspectives, *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 14, No 3, May-June 2019.



## Ruđer Bošković kao izumitelj znanstvenih instrumenata

Stipe Kutleša

### Sažetak

Uz teorijska znanstvena istraživanja Bošković je provodio i praktična istraživanja i poduzimao mjerenja u geodeziji, astronomiji, optici i tehničkim radovima raznih vrsta. Mjerenjima je pridavao veliku važnost te je sam poboljšavao postojeće mjerne instrumente, a neke je i sam konstruirao. U vezi s geodetskim mjerenjima duljine meridijanskog stupnja konstruirao je geodetske stalke i mjerne letve koje kasnije neopravdano nisu nazvane njegovim imenom. Neke astronomske i optičke instrumente izumio je da bi poboljšao određivanje relativnih položaja kometa prema zvijezdama (kružni mikrometar), da bi dobio preciznije mjerenje kutova tako što je kvadrantu dodao mikrometar kao svoje izvorno rješenje (kružni kvadrant), bitno je usavršio sektor za određivanje zenitne daljine zvijezda (zenitni sektor). Konstruirao je i novi instrument za određivanje indeksa loma svjetlosti u lećama (vitrometar) te optički mikrometar za mjerenje malih kutnih udaljenosti između Sunca i planeta te između zvijezda. U instrument su ugrađene Boškovićeve prizme s promjenjivim kutom. Konstruirao je i novu uru njihalicu.

*Ključne riječi:* R. J. Bošković, znanstveni instrumenti, geodezija, astronomija, optika

### Abstract

In addition to theoretical scientific research, Bošković also conducted practical research and undertook measurements in geodesy, astronomy, optics and technical works of various kinds. He attached great importance to measurements and improved the existing measuring instruments himself, and constructed some of them himself. In connection with geodetic measurements of the length of the meridian degree, he constructed geodetic tripods and measuring rods, which later were unjustifiably not

named after him. He invented some astronomical and optical instruments to improve the determination of the relative positions of comets to the stars (circular micrometer), to obtain a more precise measurement of angles by adding a micrometer to the quadrant as his original solution (circular quadrant), he significantly perfected the sector for determining the zenith distance star (zenith sector). He also constructed a new instrument for determining the index of refraction of light in lenses (vitrometer) and an optical micrometer for measuring small angular distances between the Sun and planets and between stars. Bošković prisms with a variable angle are built into the instrument. He also constructed a new pendulum clock.

*Key words:* R. J. Bošković, scientific instruments, geodesy, astronomy, optics

## Uvod

Ruđer Bošković svakako je najpoznatiji po svojoj teoriji prirodne filozofije koja izlaže zakon sila i strukturu tvari u području mikrosvijeta. Da je ta teorija isključivo filozofijska teorija potvrđuje i činjenica da u to doba nije još uvijek postojala eksperimentalna znanost o mikrosvijetu. Svoje zaključke Bošković nije izveo na temelju nekih eksperimenata nego prvenstveno i isključivo na temelju ispravnog razmišljanja (*recta ratiotinat*o) polazeći od načela mišljenja ([21]). Ali Bošković nije bio samo filozof prirode nego i znanstvenik koji se okušao u gotovo svim područjima kojima su se tada znanstvenici bavili, a to su prije svega astronomija, optika, geoznanosti, matematika, ali se pozabavio i drugim praktičnim problemima ([1], [3], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [23], [24], [25], [26], [28], [30], [34], [35], [38]) Nije samo stvarao teorije o prirodnim fenomenima nego je provodio eksperimente gdje je to bilo moguće i potrebno. Bošković je prema tome i znanstvenik praktičar.

Posebno poglavlje Boškovićevih praktičnih djelatnost u znanosti spadaju instrumenti koji su se koristili u astronomiji, optici, geodeziji. ([4], [17], [18], [19], [32], [33]). Bavljenje instrumentima nije bila primarna Boškovićeva djelatnost nego mu se nametnula kao nužna u njegovim istraživanjima u navedenim znanstvenim područjima. Pritom je Bošković uočavao nesavršenost i nedostatak postojećih

instrumenata pa je nudio poboljšanja, a u nekim slučajevima je konstruirao i nove instrumente. Da bi se bolje razumjelo što je Bošković poboljšao kod postojećih instrumenata, te zašto je konstruirao nove treba ukratko ukazati na znanstvene probleme koji su doveli do rasprava o instrumentima.

## 1. Boškovićeva istraživanja u astronomiji, optici i geoznanostima

Prve Boškovićeve objavljene rasprave su iz astronomije, a bavile su se pitanjima Sunčevih pjega, prolaska Merkura i Venere ispred Sunca, sjeverne zore, određivanja staza kometa, planeta, perturbacije Saturna i Jupitera, struktura Saturnova prstena, postojanje Mjesečeve i Sunčeve atmosfere i dr. (*De maculis solaribus - O Sunčevim pjegama*, 1736; *De Mercuri novissimo infra Solem transitu - O najnovijem prolazu Merkura ispred Sunca*, 1737; *De aurora boreali - O sjevernoj zori*, 1738; *De observationibus astronomicis et quo pertingat earundem certitudo - O astronomskim opažanjima i dokle seže njihova pouzdanost*, 1742; *Disquisitio in universam astronomiam - Istraživanje cjelokupne astronomije*, 1742; *Nova methodus adhibendi phasium observationes in eclipsibus lunaribus ad exercendam geometriam, et promovendam astronomiam - Nova metoda za primjenjivanje faza u Mjesečevim pomrčinama u svrhu vježbe u geometriji i unapređenja astronomije*, 1744; *De cometis - O kometima*, 1746; *Dialoghi sull'aurora boreale - Razgovori o sjevernoj zori*, 1748; *De determinanda orbita planetae - O određivanju staze planeta*, 1749; *De Lunae atmosphaere - O Mjesečevoj atmosferi*, 1753; *Osservazioni dell'ultimo passaggio di Mercurio sotto il Sole seguito a'6 di maggio 1753 fatte in Roma - Opažanje posljednjega prolaza Merkura ispred Sunca od 6. svibnja 1753, izvršeno u Rimu*, 1753; *De inaequalitatibus quas Saturnus et Jupiter sibi mutuo videntur inducere praesertim circa tempus conjunctionis - O nejednakostima za koje se čini da ih međusobno izvode Saturn i Jupiter osobito u vrijeme konjunkcije*, 1756; *De proximo Veneris sub Sole transitu - O skorašnjem prolazu Venere ispred Sunca*, 1760; *De orbitis cometarum determinandis, ope observationum parum a se invicem remotarum - Određivanje staza kometa pomoću opažanja malo međusobno udaljenih*, 1774; *Observatio eclipsis Lunae, habita Venetiis 18 maii 1761, in observatorio patrum Societatis Jesu - Opažanje pomrčine Mjeseca, koja se dogodila u Veneciji 18. svibnja 1761, u zvjezdarnici otaca Družbe Isusove*, 1774; *Teoria del nouvo astro osservato prima in Inghilterra - Teorija nove zvijezde opažane prvo iz*

Engleske, 1782). Posebno je zanimljiva Boškovićeva astronomska rasprava, točnije ep pisan u stihovima *De Solis ac Lunae defectibus - Pomrčine Sunca i Mjeseca*, 1760. (francusko izdanje *Les éclipses – Pomrčine*, 1779).

U teorijskoj optici Bošković se bavio pitanjem prirode svjetlosti (*De lumine - O svjetlosti*, 1748), a o njoj je raspravljao i u *Teoriji prirodne filozofije*, rasprostiranjem svjetlosti te pitanjem o gustoći svjetlosti (*Dissertatione della tenuità delle luce Solare - Rasprava o rjetkoći Sunčeve svjetlosti*, 1747) ([16], [20], [37]). Bošković je prvi objavio zakon rasvjete (prije 1752), ali se on naziva Lambertov zakon rasvjete (1760).

Uz astronomiju Bošković se vrlo rano počeo zanimati za geoznanosti. U 18. st. jedan od najvažnijih znanstvenih problema bio je problem određivanja oblika i veličine Zemlje ([2], [23], [25], [34], [36]).

U praktičnoj astronomiji, kao i u optici i geodeziji, Bošković je morao izvoditi opažanja i mjerenja. Na zvjezdarnici u Breri kraj Milana, za čije je osnivanje najzaslužniji Bošković, koji je izradio projekt, dijelom financirao izgradnju zvjezdarnice vlastitim financijskim sredstvima, opremio zvjezdarnicu astronomskim instrumentima, napravio plan rada na zvjezdarnici, izvedena su opažanja pomrčine Sunca, Mjeseca, Jupiterovih satelita, opažanja kometa i dr. Već na početku svoje znanstvene karijere Bošković se susreo s pitanjem nužnog korištenja instrumenata i njihove pouzdanosti. Tako je u tom smislu napisao rasprave: *De novo telescopii usu ad objecta coelestia determinanda - O novoj upotrebi dalekozora za određivanje nebeskih objekata*, 1739; *De annuis fixarum aberrationibus - O godišnjim aberacijama stajačica*, 1742; *De observationibus astronomicis et quo pertingat earundem certitudo - O astronomskim opažanjima i dokle seže njihova pouzdanost*, 1742; *Tre osservazioni dell'eclisse del Sole seguito in questo mese - Tri opažanja Sunčeve pomrčine koja se javila u tom mjesecu*, 1748; *Tre osservazioni dell'eclisse della Luna seguito la notte fra gli 8 e 9 di questo mese – Tri opažanja Mjesečeve pomrčine u noći između 8. i 9. ovoga mjeseca*, 1748; *De determinanda orbita planetae ope catoptricae ex datis vi celeritate, et directione motus in dato puncto - O određivanju staze planete pomoću katoptrike, ako je u zadanoj točki zadana sila, brzina i smjer gibanja*, 1749; *Osservazioni dell'ultimo passaggio di Mercurio sotto il Sole seguito a'6 di maggio 1753 fatte in Roma - Opažanje posljednjega prolaza Merkura ispred Sunca od 6. svibnja 1753, izvršeno u Rimu*, 1753. Svoja je djela iz

astronomije i optike Bošković izdao pod konac života u pet svezaka: *Opera pertinentia ad opticam et astronomiam - Djela koja se odnose na optiku i astronomiju*, 1785.

U praktičnoj optici Bošković je dao važan prinos istraživanju leća i njihovih pogrešaka, što je bilo važno za poboljšanje astronomskih instrumenata. Rezultat tih istraživanja su djela: *De determinanda orbita planetae ope catoptricae ex datis vi celeritate, et directione motus in dato puncto - O određivanju staze planete pomoću katoptrike, ako je u zadanoj točki zadana sila, brzina i smjer gibanja*, 1749; *De lentibus et telescopiis dioptriciis - O lećama i dioptričkim dalekozorima*, 1755; *Abhandlung von den verbesserten dioptrischen Fernröhren - Rasprava o poboljšanom dioptričkom dalekozoru*, 1765; *De recentibus compertis pertinentibus ad perficiendam dioptricam - O novim spoznajama za usavršenje dioptrike*, 1767; *De unione colorum aliorum post alios per binas substantias, ac unione multo majore per tres - O spajanju boja jednih poslije drugih pomoću dvije tvari a mnogo većem spajanju pomoću tri*, 1767; *Dissertationes quinque ad dioptricam - Pet rasprava o dioptrici*, 1767. *Memorie sulli cannochiali diottrici - Rasprave o dioptričkim dalekozorima*, 1771.

Među prvim Boškovićevim raspravama nalaze se i one o obliku Zemlje: *De veterum argumentis pro Telluris spaericitate - O argumentima starih za kuglasti oblik Zemlje*, 1739; *Dissertatio de Telluris figura - Rasprava o obliku Zemlje*, 1739; *De inaequalitate gravitatis in diversis Terrae locis - O nejednakosti teže na raznim mjestima Zemlje*, 1741. Za geodetska istraživanja najvažnije je djelo: *De litteraria expeditione per pontificiam ditionem ad dimetiendos duos meridiani gradus et corrigendam mappam geographicam, jussu, et auspiciis Benedicti XIV. Pont. Max. Suscepta a Patribus Societ Jesu Christophoro Maire et Roggerio Josepho Boscovich - O znanstvenom putovanju po Papinoj državi što su ga u svrhu mjerenja dvaju meridijanskih stupnjeva i ispravljanja zemljopisne karte poduzeli po nalogu i pod pokroviteljstvom pape Benedikta XIV oci Družbe Isusove Christophor Maire i Ruđer Josip Bošković* (1755) koje je kasnije objavljeno na francuskom jeziku pod naslovom *Voyage astronomique et géographique dans l'Etat de l'Eglise - Astronomsko i zemljopisno putovanje po Crkvenoj Državi* (1770).

## 2. Korištenje, provjeravanje, usavršavanje i konstrukcija novih instrumenata

Rečeno je da su astronomska istraživanja bila jedna od prvih kojima se Bošković bavio. Opažanja i mjerenja u astronomiji zahtijevaju mjerne sprave ili instrumente. Jednako tako za geodetska i optička istraživanja nužno je koristiti instrumente. Koliko su ti instrumenti pouzdani važno je znati da bi se uopće moglo objasniti sama mjerenja i interpretirati podatke mjerenja. Bošković je već 1742. godine osjetio potrebu da raspravi o nekim instrumentima. U raspravi *De observationibus astronomicis et quo pertingat earundem certitudo - O astronomskim opažanjima i dokle seže njihova pouzdanost* raspravlja o kvadrantu, dalekozoru s mikrometrom i uri njihovici. Posebnu pozornost instrumentima Bošković je posvetio kada je radio na programu i provedbi toga programam na zvjezdarnici u Breri te u Francuskoj kada se bavio pitanjima praktične optike za svrhe francuske mornarice ([12], str. 179-188; [24], str. 813-894; [31]).

U Boškovićevo doba (a i prije toga, a djelomično i nakon toga doba) za astronomska opažanja i mjerenja rabili su se kvadrant (za mjerenje kutova) kojeg su zamijenili sekstant i oktant, dalekozor s mikrometrom (za određivanje relativnih položaja nebeskih tijela), sektor (za određivanje zenitnih daljina zvijezda, ura njihovici (za mjerenje vremena; sekundno njihalo može poslužiti za određivanje akceleracije sile teže te tako i za određivanje oblika Zemlje). U geodeziji su se za mjerenje daljina upotrebljavale geodetske mjerne letve (motke). Nepreciznost tadašnjih instrumenata dovodila je do pogrešaka mjerenja. Zato je bilo potrebno sustavno provjeravati pouzdanost instrumenata. Bošković je pronalazio nove načine mjerenja, dodavao postojećim instrumentima nove detalje tako da je poboljšavao njihovu preciznost. Tako je povećao preciznost kvadranta, sektora, optičkog mikrometra, ure njihovice i letvi. U nekim je slučajevima smislio nove dijelove instrumenta ili konstruirao posve nove kao npr. geodetski stalak, kružni mikrometar, vitrometar, prizme (Boškovićeve prizme), dalekozor s vodom.

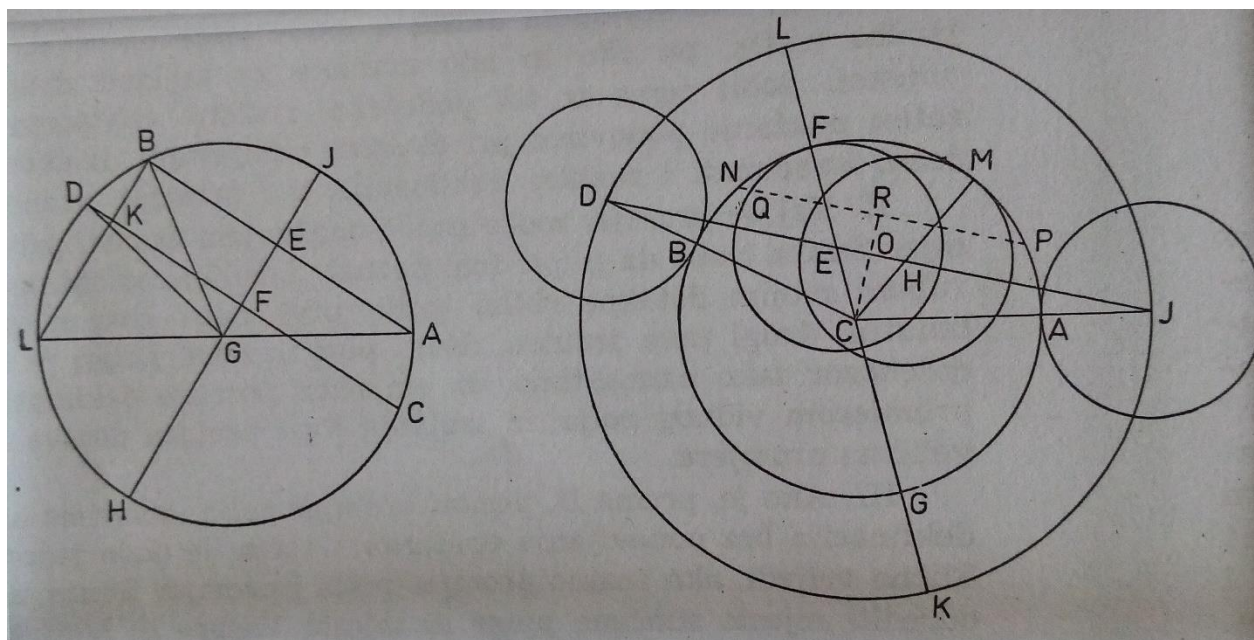
Kada je morao mjeriti i nepreciznim instrumentima smatrao je da su i oni korisni i da mogu dati precizne rezultate ako se znaju granice njihovih pogrešaka. Od godine 1766. do 1772. Bošković je sustavno ispitivao pouzdanost astronomskih instrumenata, tj. njihovu točnost. Rezultate je izložio vrlo opširno u svom djelu *Opera pertinentia ad opticam et astronomiam - Djela koja se odnose na optiku i*

astronomiju. Zaključak tih istraživanja je da i neprecizan, loš instrument može poslužiti u mjerenjima ali se pritom moraju poznavati njegove granice pogrešaka. Znamo li pogrešku instrumenta onda on može biti pouzdan kao najtočniji instrument. Bošković kaže: „Pokušao sam da iznesem metodu kojom bi astronom u svojoj zvjezdarnici mogao sam vidjeti sve i upoznati snagu svojih instrumenata; ...ovdje predložene metode ... neće biti bez koristi za unapređenje novih otkrića. ... Nakon izvršene verifikacije vrijedit će instrument s vrlo pogrešnom diobom jednako kao najbolji.“ Ali naći granice pogrešaka nije lako. Bošković je uvjeren, s pravom, da je to jedan od najvažnijih poslova praktične astronomije. „Boškovićeve su metode na tom polju značile nov i sustavan put u osnovnim pitanjima praktične astronomije.“ ([24], str. 771). Zato je u tom smislu došao do novih pronalazaka za koje kaže da je njima dao doprinos praktičnoj astronomiji više od svih astronoma. ([24], str. 777). No te ideje nisu u njegovo doba bile prepoznate kao važne. Prihvaćene su u geodetskoj praksi tek kada su ih iznijeli Carl Friedrich Gauss (1777-1855) i Friedrich Bessel (1784-1846).

## 2.1. Astronomska mjerenja – kružni mikrometar

Boškovićovo se bavljenje instrumentima ne može odvojiti od njegovih ostalih znanstvenih istraživanja. Kada se on 1739. bavio opažanjem kometa on je izričito postavio problem instrumenata, tj. pitanje upotrebe dalekozora (u svojoj astronomskoj raspravi *O novoj upotrebi dalekozora za određivanje nebeskih objekata*). Osnovna ideja je da se relativne položaje nebeskih tijela (ovdje kometa) može odrediti bez posebnih mikrometara, tj. dalekozora s mikrometrom. Pritom Bošković predlaže metodu kružne dijafragme koja je smještena u žarišnoj ravnini okulara dalekozora. Ta je dijafragma kasnije nazvana kružni (ili prstenov) mikrometar (sl 1). Dakle, kružno vidno polje dalekozora je novi način određivanja položaja nebeskih tijela. Ne ulazeći u detaljniji opis te metode (usp. [19]) dovoljno je sažeti i izreći glavnu ideju, a to je da se iz mjerenja ulaska u vidno polje dalekozora i izlaska iz njega poznate zvijezde stajačice tj. one kojoj su poznate koordinate ( $\alpha$  – rektascenzija i  $\delta$  - deklinacija) i ulaska i izlaska u vidno polje nekog nebeskog tijela može odrediti rektascenzija, razlika deklinacija i promjer vidnog polja.





Sl.1. Kružni mikrometar – Načela mjerenja u vidnom polju ([19], [32])

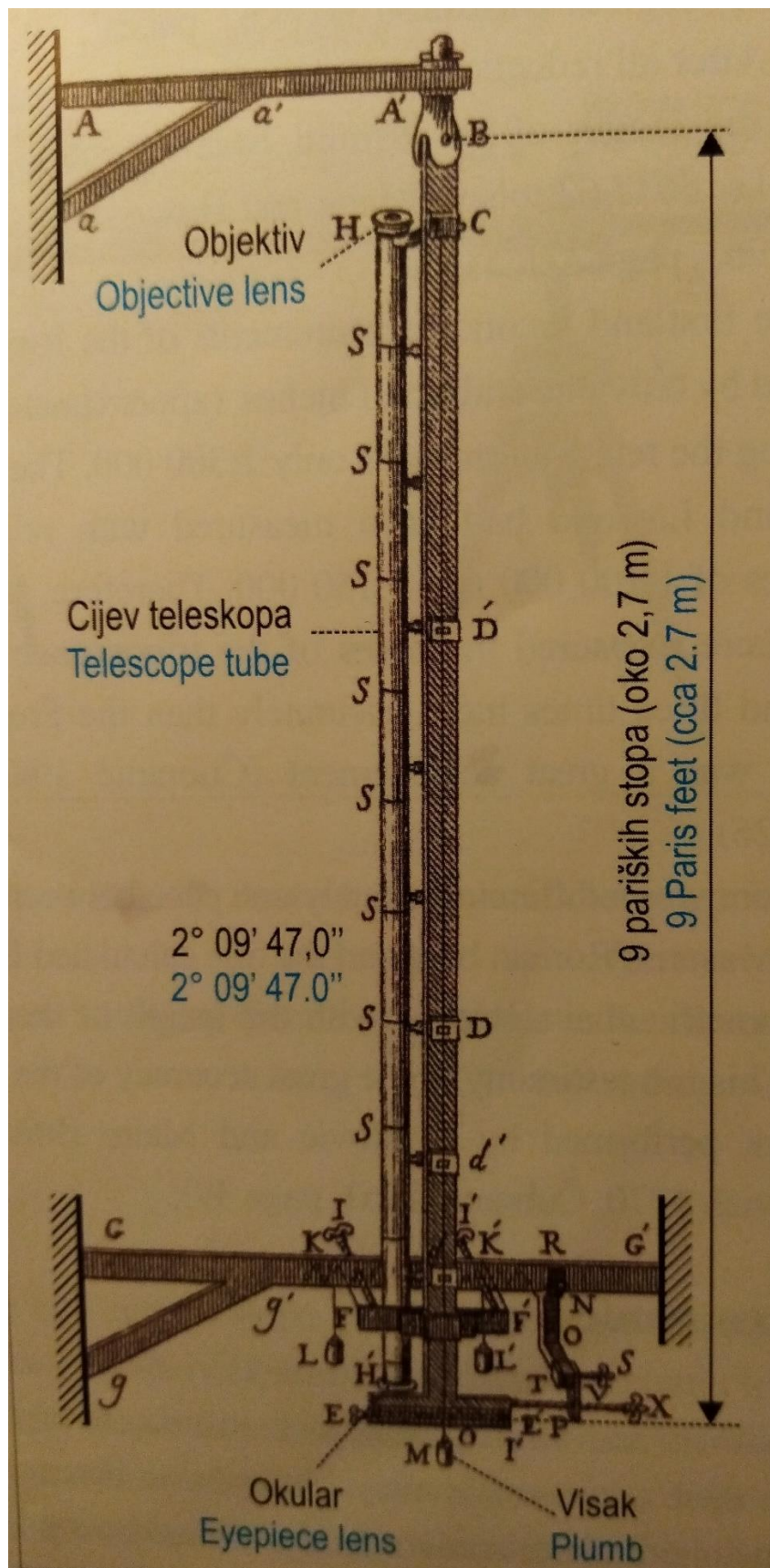
Ta je Boškovićeva rasprava pretiskana u tada poznatom časopisu *Nova Acta Eruditorum* (1740) (usp. [19], str. 98; [24], str. 82), čime je znatno povećan doseg Boškovićevih ideja o tom problemu iako tu nije vidljivo da se radi o Boškovićevoj raspravi, a pouzdano je da je to Boškovićeva rasprava. To je „najstarija publikacija o kružnom mikrometru“ ([19], str. 98). Neki su astronomi kasnije smatrali Nicolasa-Louisa de La Caillea (1713-1762) izumiteljem kružnog mikrometra jer je on 1737. napisao raspravu o kružnom mikrometru, ali ju je objavio tek 1740. u časopisu *Nova Acta Eruditorum*, dakle godinu dana nakon što je u istom časopisu objavljena Boškovićeva rasprava. La Cailleov rukopis nije mogao utjecati na druge pogotovo na Boškovića jer mu nije bio dostupan. Drugi astronomi su i prije pridavanja prioriteta La Cilleu navodili Boškovića kao izumitelja kružnog mikrometra. ([19], str. 110-118). I nakon Boškovićeva doba kružni mikrometar su razvijali Heinrich Olbers (1758-1840), Joseph von Fraunhofer (1787-1826), Friedrich Bessel, ali Boškovićovo ime s tim u vezi nisu spominjali. Kao zaključak svih rasprava o prioritetu izuma kružnog mikrometra može se kazati: „Nije Lacaille, već Bošković bio prvi, od koga su astronomi „upozoreni“ na tu novu metodu mjerenja. ... U povijesti mikrometara Boškoviću imenu pripada trajno mjesto ...“ ([19], str. 118).



## 2.2. Astronomsko-geodetska mjerenja - zenitni sektor

Kod određivanja duljine meridijanskog luka između Rima i Riminija (o tome opširnije kasnije) Bošković je morao provesti i astronomska mjerenja, tj. odrediti veličinu nebeskog luka točnije razlike geografskih širina Rima i Riminija. Za to je morao mjeriti zenitne udaljenosti od zenita odabranih zvijezda stajačica i to u Rimu i Riminiju. Izabrane su dvije zvijezde koje prolaze kroz meridijan blizu zenita u oba ta grada. Radilo se o zvijezdama  $\alpha$  u Labudu i  $\mu$  u Velikom medvjedu. Njihova je udaljenost od zenita bila svega nekoliko stupnjeva. To je važno jer se pri malim zenitnim udaljenostima odstranjuje utjecaj loma svjetlosti u Zemljinoj atmosferi i time se povećava točnost mjerenja. Naime, pogreška od jedne kutne sekunde dovodi do pogreške u duljini luka meridijana u iznosu od 16 toaza.

Za opažanje zvijezda Bošković je koristio zenitni sektor ([11], str. 41-61, 120-126; [32], str. 221-223; [33], str. 243-244) kojega je izradio svećenik Rimskog kolegija Rufo. Bošković je unio mnogo izvornih detalja čime je postigao veću točnost mjerenja. Opisuje ga vrlo detaljno (sl. 2). Kako je instrument, kao i kvadrant vrlo ubrzo zastario, nije potrebno opisivati sve detalje. Glavni dio sektora je motka na koju je pričvršćen durbin. Okular se može uvlačiti i izvlačiti čime se postiže uklanjanje paralakse. Na limbu se očitavaju vrijednosti koje odgovaraju ne zenitnim daljinama nego njihovu tangensu. Ono što je sektorom postiže je mjerenje malih zenitnih daljina. Bošković i Maire su izmjerili srednju vrijednost nebeskog luka između Rima i Riminija u iznosu od  $2^{\circ}9'47''$ .



## Sl. 2. Zenitni sektor ([33])

### 2.3. Optička mjerenja i instrumenti

Optičkim se instrumentima Bošković posebno intenzivno bavio za vrijeme kada je radio na zvjezdarnici u Breri i kada je bio ravnatelj za optiku u mornarici u Parizu. Jedan od glavnih zadataka zvjezdarnice u Breri bio je poboljšanje instrumenata, tj. uklanjanje njihovih pogrešaka da bi opažanja bila što pouzdanija. O tome je Bošković poseban prilog optici u raspravi *Dissertationes quinque ad dioptricam - Pet rasprava o dioptrici*.

#### Vitrometar - staklomjer

Boškovićevo bavljenje instrumentima rezultat je njegova bavljenja teorijom. Kako je Bošković bio jedan od najvažnijih Newtonovih pristaša uopće, on je prihvaćao mnoge Newtonove zaključke i teorije, ali nije im robovao nego je, kada je to bilo nužno, načinio odmak od Newtonova nauka. Kao student, potaknut od svojega profesora u Rimskom kolegiju, profesora matematike Orazia Borgondia (1679-1741), Bošković je čitao Newtonovo djelo *Optics - Optika* čiji je znanstveni utjecaj bio prevladavajući u to doba. I Bošković je kao i mnogi drugi prihvatio Newtonovu korpuskularnu (čestičnu) teoriju svjetlosti i njegovu teoriju boja. Newton je otkrio da svaka optička tvar ima svoj indeks loma, tj. prolaskom svjetlosti kroz nju zraka svjetlosti se lomi ovisno o točnom indeksu loma tvari. Također i svaka boja (tj. valna duljina) ima svoj indeks loma. Prolaskom svjetlosti kroz leće dolazi do kromatizma, tj. da slika predmeta nije oštra i pojavljuje se više boja; te pogreške leća Newton je objašnjavao kromatičkom (kromatskom) aberacijom. Za disperziju svjetlosti on je bio uvjeren da je ona jednaka za sve tvari i zaključio je da je nemoguće riješiti pogreške leća što se tiče eliminiranja boja. Kasnije je Chester Moor Hall (1703-1771) pokazao da to nije tako i on je proizveo leće koje su korigirale (uklanjale) pogreške koje nastaju zbog pojave spektra na optičkim sustavima (oko 1733). John Dollond (1706-1761) je otkrio akromatičnost (oko 1759) i našao da se kombinacijom dviju leća jednakih polumjera zakrivljenosti može dobiti sustav koji ispravlja (anulira) lom zrake svjetlosti ([24], str. 682; [38]). Tako je napravio akromatičke (akromatske) leće za dalekozore.

Vijest o akromatskim (akromatičnim) lećama, složenim od više leća na različite načine, brzo se širila tako da su se u Francuskoj javljale rasprave o akromatskim lećama autora kao što su npr. Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) i Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) obojica Boškovićevi dobri znanci. Za vrijeme svog boravka u Engleskoj Bošković se susreo s Dollondom koji mu je objašnjavao o svom otkriću. Bošković je imao za cilj sastaviti akromatsku leću, tj. što je moguće više ukloniti kromatsku aberaciju, a to znači da se trebalo smisliti kombinaciju prizama tako da zraka svjetlosti, koja prolazi kroz takav sklop prizama, dobije odklon, a da se pritom ne pojavi rasap svjetlosti. To je u Boškovićevo doba bio zahtjevan i hrabar poduhvat (usp. [22] str. 193). On ističe da je njegov staklomjer – vitrometar jednostavan i pogodan za određivanje loma i rasapa svjetlosti u lećama. Kao ravnatelj Optike u francuskoj mornarici imao je zadatak usavršiti proizvodnju akromatskih dalekozora. U drugoj polovici 18. st., podkraj Boškovićeve života, teorija akromatskih leća bila je dovršena, a Boškovićev doprinos toj teoriji je znatan. Teoriju je trebalo pretočiti u praksu.

U svom istraživanju leća, točnije njihovih pogrešaka Bošković je bio potaknut istraživanjima Clairauta i Dollonda. Clairaut je iznio i teoriju tj. našao formulu za pogreške sfernih leća. Pitanje istraživanja leća i poboljšanja optičkih instrumenata bilo je Boškoviću osobito važno nakon što je izgrađena zvjezdarnica u Breri. Istraživao je pogreške nastale zbog debljine leća i zbor različitih lomova svjetlosti. Svjetlost se na lećama i na prizmi lomi (refrakcija) i raspršuje (disperzija) i za svrhu eksperimentiranja s tim pojavama Bošković je izumio novi instrument kojega je nazvao vitrometar ili staklomjer. Taj je instrument trebao poslužiti za istraživanje akromatskih dalekozora i za njihovo poboljšanje i usavršavanje.

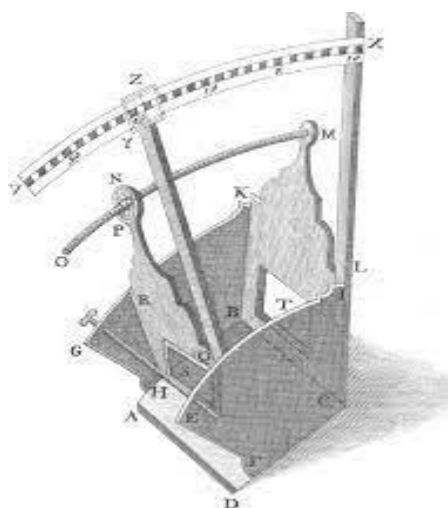
Postoje dvije inačice vitrometra. Prva iz 1763. Jedna staklena posuda u obliku prizme napunjena je vodom (vodena prizma) čiji se kut može mijenjati promjenom nagiba posude (sl. 3). Druga prizma je bila postavljena pod stalnim kutem. Ona je načinjena od tvari kojoj je trebalo odrediti indeks loma. Prolaskom svjetlosti kroz tu prizmu dolazi do loma svjetlosti. Vodena prizma može mijenjati kut; on se mijenja sve dotle dok ne dođe do poništenja loma koji je izazvala prizma s konstantnim kutom.

Prvu inačicu vitrometra Bošković je usavršio tako što je vodenu prizmu zamijenio Abatovom prizmom koju je konstruirao franjevac Abat. Prizma se

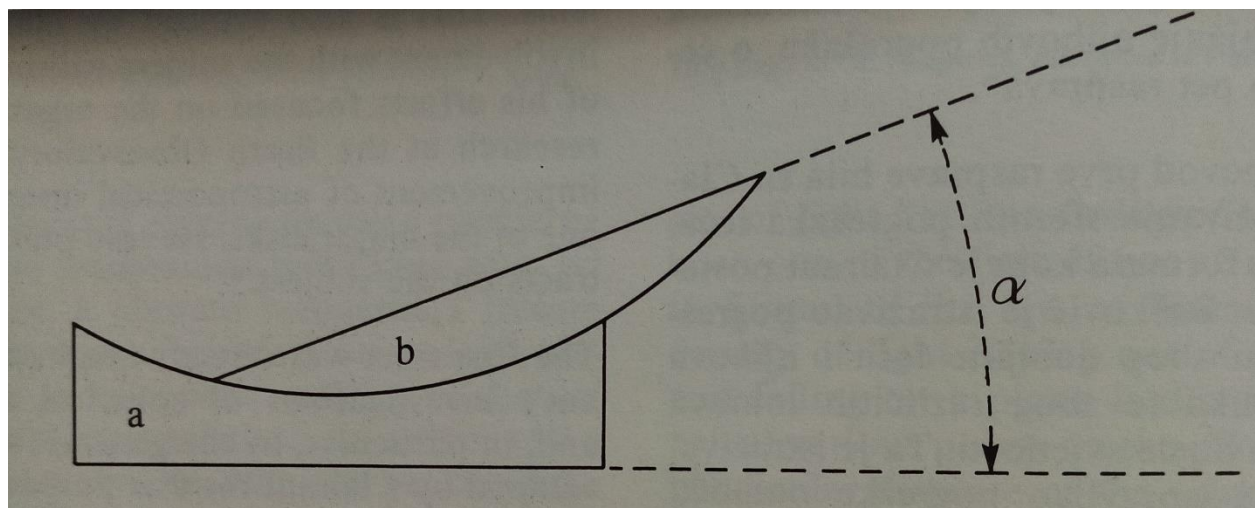
sastojala od dva dijela od istog stakla ali tako složenih da plankonveksni i plankonkavni dio jednake zakrivljenosti prijanjaju jedan uz drugi i mogu kliziti jedan po drugome tako da se kut prizme mijenja (kut između ravnih osnovica) (sl. 4). O važnosti te prizme i njezinoj pogodnosti za Boškovićev vitrometar svjedoči Boškovićeva prepiska s njegovim znanstvenim poznanicima i prijateljima ([24], str. 684-687). Svojim staklomjerom Bošković je mogao dobiti brojevne podatke o indeksu loma i disperziji raznih vrsta stakala što „pokazuje veliku Boškovićevu vještinu i dovitljivost i u njegovu eksperimentalnom radu“ (sl 5) ([22], str. 202). Bošković je vršio pokuse sa svojim vitrometrom u Rimu, Milanu, Paviji, a za njih su bili zainteresirani u i Engleskoj. ([22], str. 688).

Eksperimenti s vitrometrom naveli su Boškovića na pomisao da se umjesto dvije leće mogu upotrijebiti tri ili više leća da bi se ujedinilo toliko spektralnih linija koliko ima leća. Bošković je, naime, mislio da se s dvije leće mogu ujediniti samo dvije boje (spektralne linije), s tri tri boje. Što se više boja sjedini to je dalekozor savršeniji ([22], str. 682, 685).

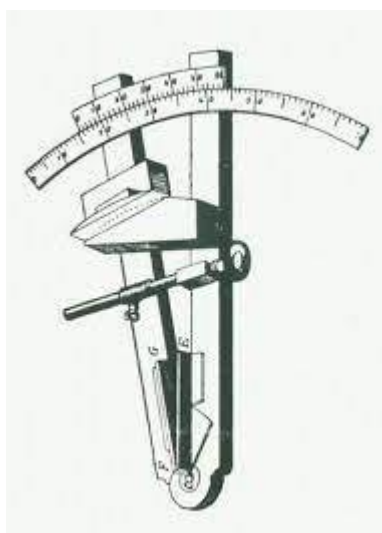
Iako su vitrometri kao instrumenti postali zastarjeli Fraunhoferovom primjenom spektrometra ipak je historijska važnost Boškovićeva vitrometra ogromna što su poslije isticali mnogi znanstvenici kao npr. J. E. Montukla, V. Ronchi i drugi. Oni navode da je Bošković najviše od svih znanstvenika radio na akromatskim dalekozorima te da se zbog istraživanja sustava s tri leće „može smatrati pionikom u tom području praktične optike“ ([22], str. 694).



Sl. 3. Boškovićev vitrometar – prva inačica ([22], [24], [32])



Sl. 4. Prizme s promjenjivim kutom ([22], [24])



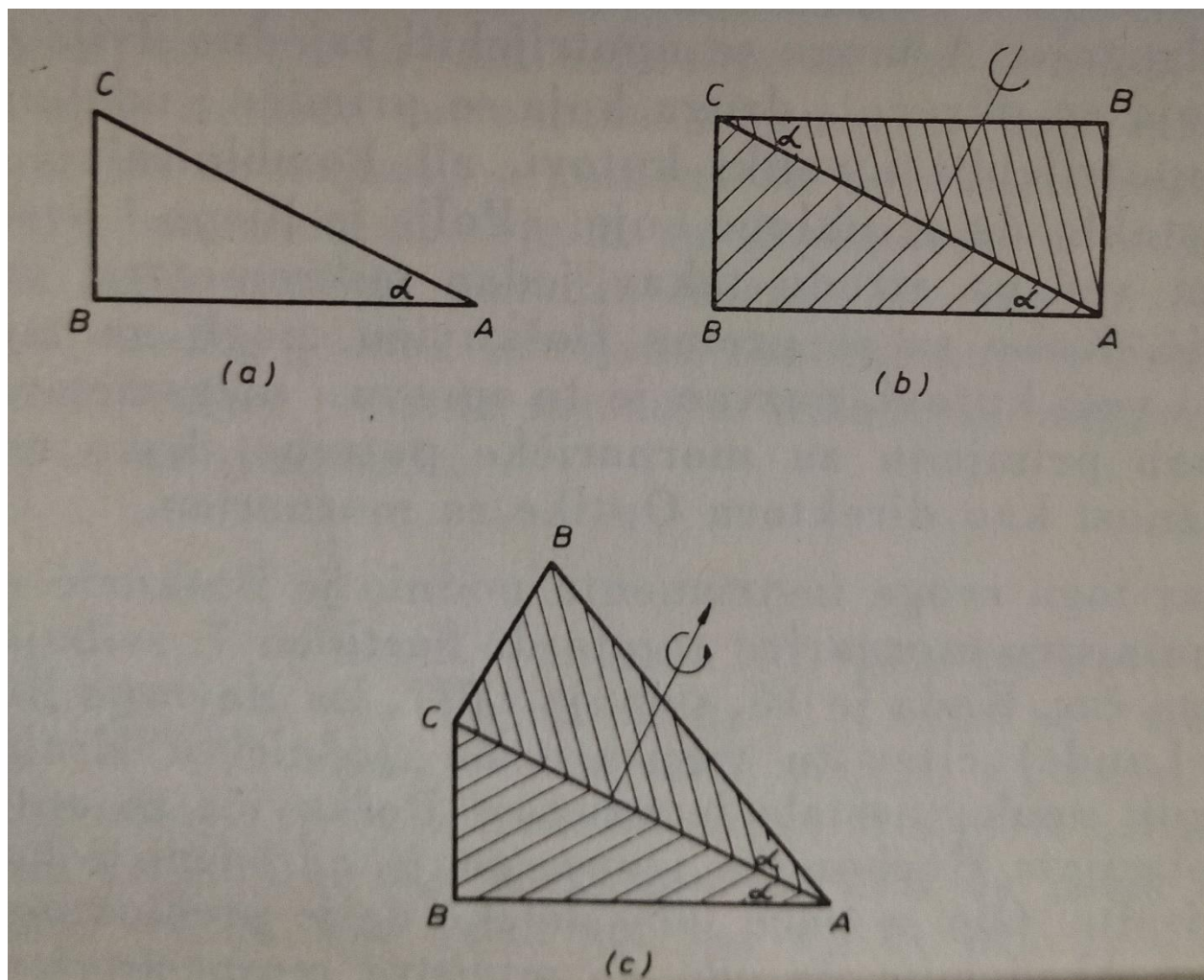
Sl. 5. Boškovićev vitrometar – druga inačica ([22], [24], [32])

### Optičke prizme - novi optički mikrometar

Francuski fizičar Rochon je 1777. konstruirao instrument za mjerenje promjera Sunca, planeta te za mjerenje malih udaljenosti među zvijezdama. On je u

svom optičkom mikrometru koristio prizmu od gorskog kristala (kvarca) koja ima svojstvo dvoloma tako da se dobiju slike dvaju predmeta u istom mjestu vidnoga polja dalekozora. Na taj se način može odrediti optička udaljenost tih predmeta (npr. bliskih zvijezda). Novost koju je uveo Bošković jest u tome što se isti učinak može postići upotrebom prizme od običnog stakla i to na dva načina: tako da se prizma, smještena između objektiva i žarišta dalekozora, pomiče duž osi dalekozora i drugo da se prizma stavi ispred objektiva dalekozora ali tako da dio objektiva ostane nepokriven i da postoje dvije vrste zraka: jedna prolazi samo kroz objektiv, a druga i kroz objektiv dalekozora i kroz akromatičnu prizmu. U oba se slučaja dobije isti učinak kao i kod Rochona. Bošković je iznio i drugu konstrukciju tako da je dvije prizme mogu rotirati oko zajedničke osi. Dva krajnja položaja prizama su takvi da one čine ili kut  $0$  stupnjeva ili  $2\alpha$  stupnja (alfa je  $\alpha$  kut prizme) (sl. 6). U ostalim položajima kutevi su između  $0$  i  $2\alpha$  i u svakom pojedinom položaju imamo određeni kut loma zraka koje dolaze od predmeta. Takvim mikrometrom mogu se mjeriti i veći kutevi. Zato ga je Bošković nazvao megametrom. Takva se konstrukcija i danas koristi u geodetskoj praksi. Ona se naziva Boškovićev dvostruki zakretni par (Drehkeilpaar nach Boscovich) ([4], [5], [24], str. 875).





Sl. 6. Kružne prizme u različitim položajima ([12], [24])

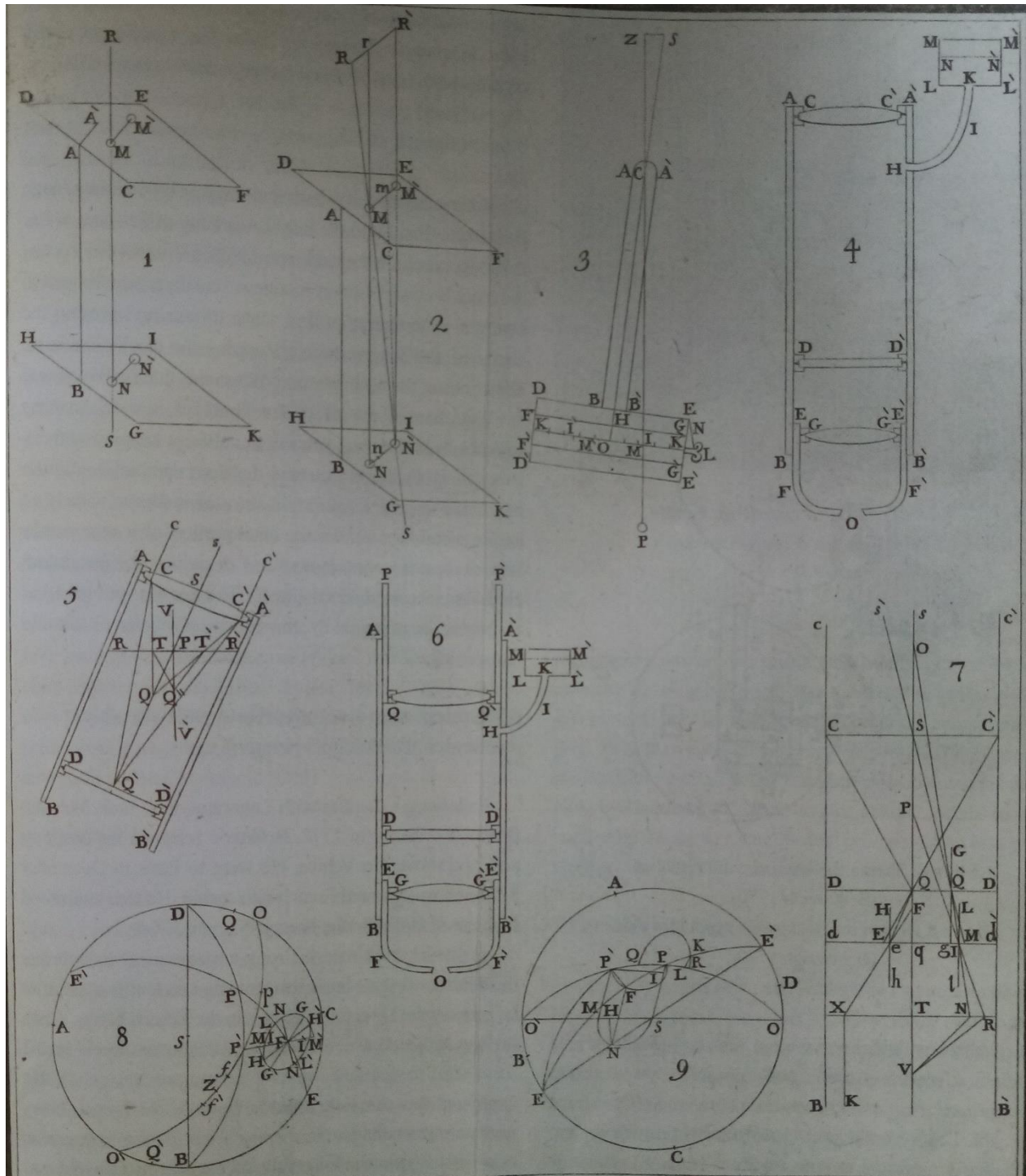
Kao i u slučaju određivanja staza kometa, kada je između La Placea i Boškovića izbio znanstveni spor, tako je i u vezi s optičkim mikrometrom nastao spor između Rochona i Boškovića o prvenstvu izuma (usp. [5], [24], str. 868-876). Iako je presuda Akademije znanosti u Parizu bila nepravedna prema Boškoviću, on je kasnije dobio zadovoljštinu jer najnovija literatura navodi jedino Boškovića kao izumitelja navedenih staklenih prizmi ([12], str. 185). Sam taj spor učinio je da je Bošković imao sve manje šansi postati članom Akademije. Što se prioriteta tiče sam je govorio da mu je manje važno tko je izumitelj, a puno mu je važnije hoće li to koristiti astronomiji ([24], str. 981).



## Dalekozor s vodom - Dilema o prirodi svjetlosti

U optici je posebno važan Boškovićev pokus kojim je htio odrediti brzinu svjetlosti u različitim optičkim sredstvima i tako ustanoviti narav svjetlosti, tj. njezinu brzinu u različitim optičkim sredstvima. Time bi se moglo odrediti i apsolutno gibanje Zemlje. Pokušaj odgovora na to pitanje doveo je kasnije do teorije relativnosti u 20. stoljeću.

Godine 1727 James Bradley (1693-1762) našao je aberaciju zvjezdane svjetlosti i protumačio je kao rezultat gibanja Zemlje, točnije kombinacijom brzina Zemlje i svjetlosti. Aberacija svjetlosti može poslužiti kao metoda mjerenja brzine svjetlosti dok ona prolazi kroz neko optičko sredstvo ili instrument. Bošković je u tome vidio način da izmjeri brzinu svjetlosti u vodi. Zamislio je pokus s dalekozorom s vodom (sl. 7). To je mjerenje trebalo biti *experimentum crucis* koji bi odredio koja je od dvije teorije svjetlosti istinita: čestična ili valna teorija ([28]). Prema Newtonovoj čestičnoj teoriji brzina svjetlosti u nekom optičkom sredstvu veća je nego brzina svjetlosti u vakuumu. Prema Huygensovoj (Christiaan Huygens (1629-1695)) valnoj (undulatornoj) teoriji svjetlosti brzina svjetlosti u optičkom sredstvu je manja od brzine svjetlosti u vakuumu. Dakle u Newtonovu slučaju  $v_k = n c$ , a u Huygensovu  $v_v = c/n$ , gdje su  $v_k, v_v$ , brzine svjetlosti prema korpuskularnoj, odnosno valnoj teoriji,  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu, a  $n$  indeks loma optičkog sredstva. Prema Newtonovoj korpuskularnoj teoriji svjetlosti, čiji je zagovornik bio i Bošković, brzina svjetlosti bila bi veća u gušćem optičkom sredstvu, tj. i u vodi, a aberacija manja.



Sl. 7. Dalekozor s vodom ([32])

Škotski astronom Patrick Wilson (1743-1811) zastupao je također Newtonovu teoriju svjetlosti ([38], str. 372-373; [18], str. 81-86) i tvrdio je da dalekozor s

vodom daje aberaciju jednaku Bradleyevoj aberaciji (1782). Nema, dakle, razlike između aberacija u dalekozoru s vodom i u običnom dalekozoru. Iako je zastupao istu Newtonovu teoriju Boškoviće je ipak tvrdio da dalekozor s vodom mora dati manju aberaciju.

U literaturi se pojavilo pitanje o prioritetu u vezi s dalekozorom s vodom. Ne ulazeći detaljnije u to pitanje može se zaključiti je da Wilson zaboravljen i da mnogi britanski i drugi znanstvenici prioritet po tom pitanju pridaju Boškoviću. Kada su drugi, nakon Boškovićeve smrti, pokušavali izvesti pokuse s dalekozorom s vodom onda su se uglavnom pozivali na Boškovića. Tako npr. lord Rayleigh navodi (1892) da je kraljevski astronom u Greenwichu George Biddell Airy (1808-1892) izveo pokus onako kako ga je predložio Bošković i Rayleigh ga naziva „Boškovićev pokus“ („the experiment of Boscovitch“) ([18], str. 88).

Uvjeren u ispravnost svojih pretpostavki Bošković je svoj dalekozor s vodom namjeravao upotrijebiti da odredi aberaciju zemaljskih izvora svjetlosti (terestička aberacija) ([27], [38]). O ideji dalekozora ispunjena s vodom Bošković govori 1765 u korespondenciji sa Stefanom Contijem, svojim prijateljem i patricijem Republike Lucca. Bošković o tome govori i 1766. (u pismu francuskom akademiku Lalandeu) te 1773. (u pismu Giovanu Battisti Beccariji (1716-1781), profesoru u Torinu) ([24], str. 667-672). Pokus s dalekozorom ispunjenim vodom Bošković nikada nije proveo zahvaljujući protivljenju tadašnjeg profesora u Dvorskim školama Paola Frisija, koji nije bio sklon Boškoviću, a za to su bila potrebna i velika financijska sredstva ([24], str. 770).

Nakon što su mnogi na Boškovićevu tragu provodili eksperimente s aberacijom u 19. stoljeću ([24], str. 203-227; [38], str. 376 -384) može se zaključiti: „Pokusi sa B-evim dalekozorom jesu – bar kao prilog – najstariji u nizu pokusa, koji se završio Michelsonovim i koji je doveo do novovjekih relativističkih nazora.“ ([18], str. 187). „Prema tome, mi smo još uvijek, iako neizravno, očarani Boškovićevim prijedlogom iz 1766.“ ([38], str. 384). Boškovićev pokus se i danas smatra jednim od najvećih priloga eksperimentalnoj optici. Zato: „Nijedan prikaz povijesnog razvoja novih ideja o prostoru i vremenu i njihova empiričkog osnova ne će moći prešutjeti B-evo ime. On stoji vremenski na prvom mjestu.“ ([18], str. 187). Time je Boškovićeve ideje i prijedlog o dalekozoru s vodom „svoju znamenitu ulogu izvršio.“ ([18], str. 227).

## 2.4. Geodetska mjerenja

Bošković i njegov isusovači subrat i suradnik, engleski isusovac Christopher Maire (1697–1767) dvije su godine mjerili duž meridijana na kojem se nalaze Rim i Rimini (1750–52), a rezultat su objavili u djelu *De litteraria expeditione per pontificiam ditionem* (*O znanstvenom istraživanju po Papinskoj državi*) (1755), koje je poslije objavljeno u francuskom prijevodu *Voyage astronomique et géographique* (*Astronomsko i zemljopisno putovanje*) (1770).

Za određivanje duljine luka meridijana koji odgovara jednom stupnju obično su se obavljale dvije vrste mjerenja, geodetska i astronomska. Svrha geodetskih mjerenja je određivanje duljine meridijanskog luka na Zemlji. Astronomska mjerenja trebaju odrediti duljinu luka na nebeskoj sferi koji odgovara kutu od jednoga stupnja. Zatim se uspoređuju ta dva luka i gleda se postoji li razlika. Iz duljina meridijanskog luka na različitim dijelovima Zemlje moglo se zaključiti o obliku Zemlje, točnije je li Zemlja spljoštena na polovima (oblatum) ili na ekvatoru (oblongum) kako su pretpostavljale tada dvije suprotstavljene teorije. O obliku Zemlje moglo se zaključiti i jednom drugom metodom, naime gravimetrijskom metodom, tj. mjerenjem sile teže (točnije akceleracije sile teže) pomoću sekundnog njihala. Takva je mjerenja provodio i Bošković. O gravimetrijskim mjerenjima (eksperimentima) piše u raspravi *O nejednakosti teže na raznim mjestima Zemlje* (*De inaequalitate gravitatis in diversis Terrae locis*). Iz mjerenja duljine sekundnog njihala na različitim dijelovima Zemlje moglo se naslutiti, iako ne posve sigurno i odrediti, je li Zemlja pravilno geometrijsko tijelo, rotacioni elipsoid kako pretpostavlja teorija. U prvoj od pet knjiga *De litteraria expeditione per pontificiam ditionem* (*O znanstvenom istraživanju po Papinskoj državi*) (1755) Bošković svjedoči da je on već puno prije objave te knjige bio uvjeren da je Zemlja nepravilnog oblika te da nije pravilni elipsoid. No kakav je taj oblik ne kaže jasno i sa sigurnošću. Čak je sklon mišljenju da se taj oblik vrlo teško može odrediti. On ga zove jednostavno *Zemljin oblik* ([11], str. 23, 114-117; [33], str. 247). O tom obliku također govori u petoj knjizi djela *De litteraria expeditione* ...Istraživanja tog oblika su tek započela, kaže Bošković ([11], str. 115). Potvrdu tome daju rezultati kasnijih istraživanja koji su ustanovili posve nepravilan oblik Zemlje kasnije (1873) nazvan geoid ([11], str. 115; [33], str. 248-250).

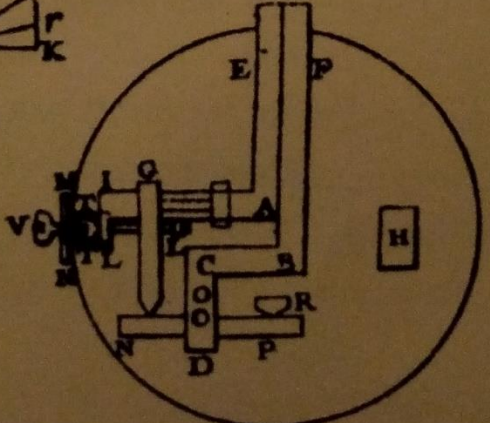
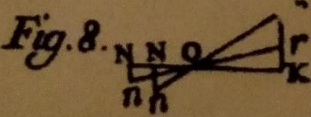
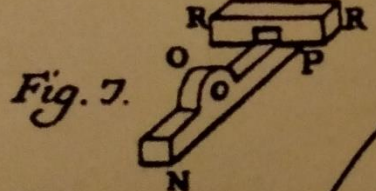
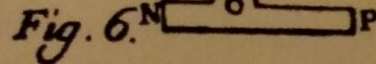
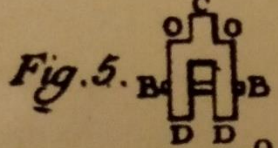
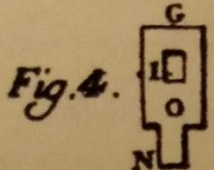
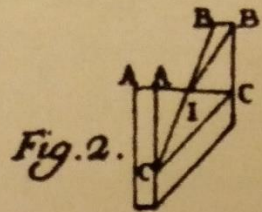
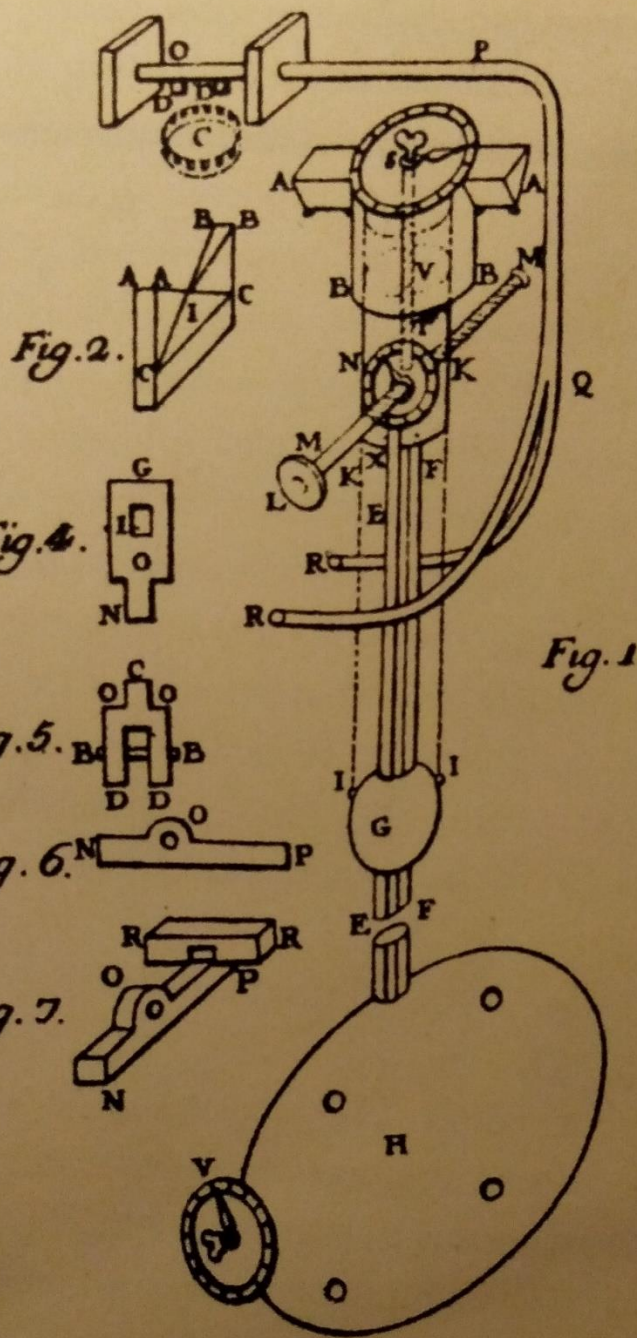
Bošković je ustanovio da postoje otkloni od vertikale na površini Zemlje u blizini velikih planina i zaključio da su mase planina manje nego što bi trebale biti, a to znači da su gustoće planina manje nego gustoće dubljih slojeva Zemlje. Nastanak planina tumači toplinskim širenjem tvari tako da u Zemljinoj kori postoje nagomilavanja (suficiti) masa i šupljine (deficiti). To su začeci kasnije *teorije izostazije* koju su postavili godine 1854/55 John Henry Pratt (1809-1879) i George Airy (1801-1892) te (oko 1950) Felix Andries Vening Meinesz (1887-1966): Prattov bi model zapravo trebalo zvati Bošković-Prattovim modelom izostazije. ([11], str. 116-117).

### Gravimetrijska mjerenje – ura njihalica

Otkriće nejednakosti sile teže na različitim mjestima Zemlje potječe od Jeana Richera (1630-1696) koji je tu pojavu otkrio 1672. godine. Ali praktična mjerenja nisu bila provođena čak ni u Italiji, iako su vrlo jednostavna, pa Bošković misli da bi se mogla izvesti i u Dubrovniku ([24], str. 101). Na tu je ideju došao jer je sam u Italiji počeo s tim mjerenjima. Određivao je duljinu sekundnog njihala i kaže da se na taj način može odrediti sila teža (točnije akceleracija sile teže  $g$ ) na različitim mjestima. Prema formuli za sekundno njihalo sile teže odnose se kao duljine sekundnog njihala. Razmišljanja o tome može li se tom metodom potvrditi Newtonova teorija o Zemlji kao rotacionom elipsoidu spoljštenom na polovima Bošković je iznio u raspravi *O nejednakosti teže na raznim mjestima Zemlje (De inaequalitate gravitatis in diversis Terrae locis)*. Osnovna ideja je da se bilo koja teorija mora podkrijepiti mjerenjima. U slučaju oblika Zemlje on već iz mjerenja duljine sekundnog njihala poriče da se time može dokazati vrtnja Zemlje jer uzroci nejednakosti sile teže nisu jednoznačno određeni i mogli bi imati više uzroka. Nije nužno da je gustoća Zemlje jednaka u svim dijelovima i zbog toga može doći do odstupanja u mjernju sile teže koja nastaju zbog nepravilnosti kako na površini Zemlje tako i njezine unutrašnjosti ([2], [23], [26], [34]). Da nema tih nepravilnosti oblik Zemlje bi se mogao odrediti sekundnim njihalom. Kao metoda za određivanje oblika Zemlje sekundno njihalo, tj. gravimetrijska mjerenja su pogodnija nego geodetska mjerenja meridijanskog stupnja. Iz duljina sekundnog njihala na što više mjesta može se zaključiti da je oblik Zemlje nepravilan i da nije posve sigurno može li se uopće odrediti. „Ništa ne znamo sigurno ... osim prvih načela...” ([24], str. 1013).

Bošković je i kasnije priličnu pozornost posvećivao sekundom njihalu pa je konstruirao uru njihalicu kojom je htio umanjiti ili eliminirati pogrešku njihala koja nastaje zbog promjene temperature. Svoju uru njihalicu Bošković je ponudio na prosudbu Akademiji znanosti u Parizu, ali ocjena nije bila zadovoljavajuća jer je povjerenstvo dalo Boškoviću primjedbu da konstrukcijska rješenja nisu nova. Boškovićev odgovor prosudbenom povjerenstvu u Parizu bila je rasprava pod naslovom *Descrizione d'un nuovo pendolo a correzione* (*Opis nove ure njihalice s korekcijom*) objavio je 1770, a temu o uri njihalici Bošković je uvrstio i u svoja *Djela o optici i astronomiji* (1785) (sl. 8) ([32], str. 226, 228).





## Sl. 8. Ura njihalica ([24], [32])

### Geodetska mjerenja – stalci i letve

Geodetski dio mjerenja meridijanskog luka (gradusnog mjerenja) između Rima i Riminija obavili su Bošković i Maire ([24], str. 317-325). Upotrijebili su od prije poznatu metodu triangulacijskih poligona ili lanca trigonometrijske mreže ili triangulacijskog lanca ([11], str. 31-41; [24], str. 326-328; [29], [33], str. 237-243). Taj način mjerenja uveo je 1617. godine nizozemski astronom i matematičar Willebrord Snellius (pravo prezime Snell van Royen (oko 1580 – 1626)). Prije toga izravno su se mjerile duljine meridijana što je uzrokovalo velike pogreške jer se radilo o mjerenju dužina do oko 100 km (Fresnel, Picard, Cassini i drugi) ([15]). Triangulacijska mreža trokuta smanjila je potrebu izravnog mjerenja meridijana i mjerenja su bila preciznija zbog manjih udaljenosti (stranica baza). Duljine stranica trokuta iznosile su od nekoliko kilometara do desetak-dvadeset kilometara, a meridijanski likovi oko stotinjak kilometara.

Rim i Rimini, koji se nalazi na Jadranskoj obali, nalaze se na istom meridijanu s razlikom geografskih širina od  $2^{\circ}10'$ . Prva točka trigonometrijskog lanca je kupola bazilike sv. Petra u Rimu, a druga jedan brežulja u blizini Riminija (sl. 9). Tu zemaljsku udaljenost trebalo je izmjeriti. U tu svrhu su se postavili trokuti s jedne i druge strane meridijana s vrhovima trokuta na obližnjim brdima. Mjerenje se sastojalo iz mjerenja jedne stranice i dva kuta trokuta; ostali se elementi izračunaju. Tako se dobije duljina dijelova luka. U Boškovićevu i Maireovu slučaju trigonometrijski lanac imao je 11 trokuta na ukupnoj dužini lanca od 240 km. Oni su posebnu pozornost posvetili točnijem mjerenju duljina baza koja su u prijašnjim mjerenjima također stvarala teškoće zbog neravnina terena ([1], [10], [11], [24]).



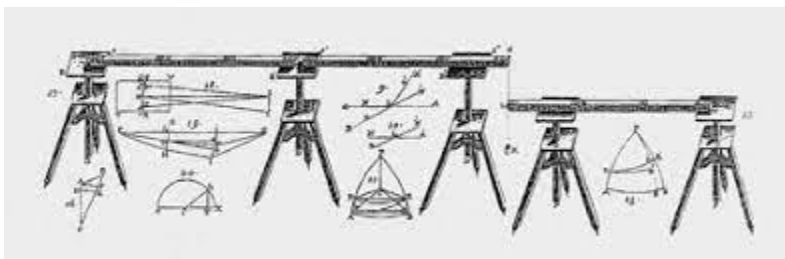


Sl. 9. Triangulacijska mreža Rim – Rimini ([24], [33])

Ono što je za ovu svrhu važno jesu sprave (instrumenti) koje su koristili. Za mjerenje duljina od prije su se koristile mjerne letve (motke). Bošković i Maire su imali drvene letve duljine oko 6 metara (točnije 27 rimskih pedalja ili 5,994 m) podijeljene na tri dijela, a oni su bili podijeljeni na manje jedinice. Kao komparator služile su željezne letve od po 9 pedalja (1,98 m). Kako se u različitim godišnjim dobima, tijekom mjerenja, temperatura mijenjala, oni su računski korigirali duljine

komparatora na osnovi mjerenja temperature i poznavanja koeficijenta istezanja željeza. Kasnije je iz Pariza dobio mjernu jedinicu izrađenu od željeza koju su koristili pariški akademici. Ta je mjera toaz (toise) (1 toaz = 1,949036 m) bila podijeljena na manje jedinice: stope, palce i dijelove palca ([11], str. 118-119; [24], str. 317-334).

Da bi povećao preciznost mjerenja letvama Bošković je došao na ideju da mjerne letve postavi u horizontalni položaj. Da bi to postigao konstruirao je stalke i na njih stavio letve (Prije su se duljine mjerile tako da su letve postavljane izravno na teren – „kontaktne“ letve). Podizanjem i spuštanjem središnjeg dijela stalka i pomoću libele postizala se horizontalnost letvi (sl. 10). Druga Boškovićeva novost bila je da se letve nisu dodirivale nego je između njih postojao razmak koji su precizno mjerili koristeći visak te šestar i transverzalno mjerilo. Postojala je, naime, opasnost da se dodirom letava one mogle pomaknuti. Kod Boškovića letve su bile postavljene u različite razine i pomoću viska određivao se vertikalni položaj krajeva letava.



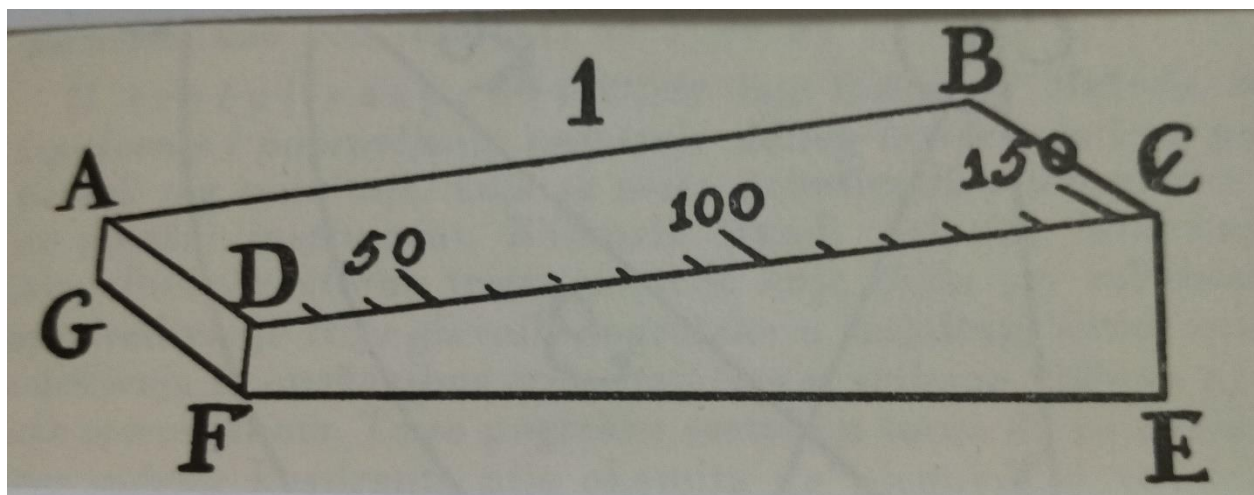
Sl. 10. Boškovićevi geodetski stalci i letve ([12], [32])

Izmjerom rimske i riminske baze Bošković i Maire su dobili rezultate: 6139,66 toaza i 6037,62 toaza (oko 12 km) ([11], str. 37-41, 125; [33], str. 242-243). Za riminsku bazu proveli su dva mjerenja koja su se razlikovala samo za jedan i pol palac (oko 4 cm) što je dvostruko i trostruko točnije od francuskih mjerenja provedenih u Peru i Laplandiji. Kasnije, u 19. st. su duljine baza bile kraće (2-3 km), ali u 20. st. su baze opet produljene na 8-10 km tako da „se smatra za optimum, da dužine strana budu upravo nekako u tim granicama, kakvje je imao i Bošković.“ ([11], str. 126).

On je, dakle, konstruirao nove, dotad u geodeziji nepoznate stalke ili tronošce s letvama na njima (a ne na zemlji) koje se ne dodiruju. Takvi su stalci u geodetskoj praksi prihvaćeni tek kasnije, kako je već rečeno, kada ih je predložio Gauss, pa se i nazivaju Gaussovi stalci umjesto Boškovićeви stalci ([17]).

#### Geodetska mjerenja – kružni kvadrant

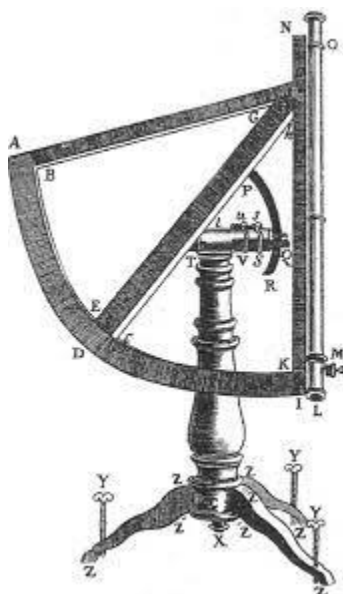
U triangulacijskoj mreži važno je što točnije odrediti duljine stranica trokuta i njihove kutove. Za veću točnost duljina stranica Bošković je koristio tronošce i mjerne motke. Za mjerenje kutova u horizontalnoj ravnini koristio je kvadrant koji se od prije bio u upotrebi. Za velike kvadrante bilo je važno odrediti ravninu kvadranta. Bošković je „našao duhovitu i egzaktnu metodu“ iskoristivši svoj mikrometarski klin (sl. 11) koji se smatra „jednim od njegovih najljepših iznalazaka“ ([24], str. 772). Takav je klin kasnije uveo u geodetsku upotrebu Friedrich Bessel ([24], str. 773).



Sl. 11. Mikrometarski klin ([24])

Bošković je, dakle, postojeće kvadrante poboljšavao dodajući im pojedine dijelove. Tako je dodao i mikrometar, kao izvorno svoje rješenje, da bi se povećala točnost očitavanja kutova. Na kvadrant su postavljena dva durbina, jedan čvrst, a drugi na pomičnoj metalnoj poluzi (sl. 12). Kad se kvadrant postavi u ravninu kuta nepomični se durbin usmjeri na jednu točku, a drugim se navizira druga točka i očitava

limb na drugom durbinu ([11], str. 122; [32], str. 221). Bošković je kvadrantu dodao i druge važne detalje. Te pojedinosti on detaljno opisuje u II. glavi četvrte knjige *De litteraria expeditione* ...U sljedećim raspravama govori o zidnom kvadrantu i sekstantu, verifikaciji njihove ravnine, pogreškama instrumenta i sl. Tako „da je pošao najdalje in sustavno uočio i istražio ... sve momente koji se javljaju prim tim vrlo važnim i osjetljivim pitanjima. Tim je raspravama Bošković postavio osnov nove praktičke astronomije i bio mišljenja da te njegove rasprave čine jedan priručnik praktičke astronomije njegova vremena.“ ([24],str. 777).



Sl. 12. Kvadrant ([32], [33])

## Zaključak

Bošković je dao znatne doprinose u raznim područjima znanosti i filozofije, prije svega u teorijskim područjima. Ali je u svrhu provjeravanja i potvrđivanja teorije Bošković bio primoran vršiti mjerenja i eksperimente. Koristio je postojeće eksperimente i oučavao da ni oni nisu uvijek pouzdani pa ih je morao poboljšavati, a u nekim slučajevima je konstruirao i nove instrumente ili detalje na već postojećim. Općenito je mislio da i loši instrumenti mogu poslužiti za mjerenja ako se znaju njihove pogreške, tj. granica pogrešaka koje se onda mogu odračunati.

Od astronomskih instrumenata važan je kružni mikrometar koji je Bošković izumio 1739. godine kojim je određivao relativne položaje kometa. Zenitnim sektorom je mjerio zenitne udaljenosti zvijezda, a taj je sektor poboljšao da bude što točniji jer je o tome ovisila i točnost određivanja duljine meridijanskog luka. U svrhu točnijeg mjerenja malih kutnih udaljenosti zvijezda i Sunca i planeta usavršio je mikrometar tako da je prizmu od kvarca zamijenio prizmom od običnog stakla. U drugom slučaju je načinio još jednu preinaku tako da je upotrijebio dvije prizme koje rotiraju jedna oko zajedničke osi. Te su prizme kasnije nazvane Boškovićeve prizme. U namjeri da određuje indekse loma svjetlosti u lećama i rasap svjetlosti konstruirao je dvije inačice staklomjera (vitrometra) čime je doprinio istraživanju akromatskih dalekozora. Znamenita je Boškovićeva ideja kako eksperimentalno odrediti brzinu svjetlosti u različitim optičkim sredstvima i na taj način odlučiti koja je teorija svjetlosti prava. Iako pokus nikada nije izveden smatra se jednim od sofisticiranih pokusa u optici uopće.

U geoznanostima je imao nekoliko izvornih ideja i dalekosežnih zaključaka koji su bili djelomično podkrijepljeni mjerenjima. Ideju o nepravilnom obliku Zemlje kao i o strukturi njezine unutrašnjosti naslutio je iz gravimetrijskih mjerenja duljine sekundnog njihala. Da bi bio još uvjereniji u to provodio je mjerenja meridijanskog stupnja, tj. duljine luka meridijana koji odgovara kutu od oko dva stupnja (kutna udaljenost Rima i Riminija na Jadranskoj obali). Preciznost mjerenja osigurao je izumom geodetskih stalaka i postavljanjem mjernih letvi u horizontalni položaj. U nekoliko slučajeva Bošković je imao znanstvene sporove oko prioriteta otkrića ili izuma. Ipak je Boškoviću kasnije djelomično pripala zadovoljština. On je bio posve svjestan dometa svojih otkrića i izuma pogotovo kada u vezi s poboljšanjem instrumenata i izumom novih za sebe kaže da je praktičnoj astronomiji doprinio više od drugih.

## Literatura

[1] N. Abakumov: Astronomsko-geodetski radovi Rudjera Boškovića, *Almanah Bošković* 1950, str. 192-199.

[2] N. Abakumov: Geoid, *Almanah Bošković* 1951, str. 172-182.

- [3] V. Bialas: Boscovich als ingenieurwissenschaftlicher Gutachter und Wissenschaftsinitiator, in: H. Grössing, H. Ullmaier (Hrsg.): *Ruđer Bošković (Boscovich) und sein Model der Materie*, Wien 2009, S. 29-40.
- [4] B. Borčić: Doprinos Ruđera Boškovića konstrukciji geodetskih daljinomjera s dvostrukim slikam, *Rad JAZU* 1965, 331, str. 211–236.
- [5] B. Borčić: Spor Bošković–Rochon povodom Boškovićeve rasprave »Mémoire sur un nouveau micrometre et mégametre«, *Rad JAZU* 1968, 343, str. 135–192.
- [6] J. Casanovas: Boscovich's Early Astronomical Studies at the Collegio Romano, u: Piers Bursill-Hall (ed.): R. J. Boscovich: *Vita e attività scientifica/His life and scientific work*, Roma 1993, str. 237-244.
- [7] P. Cassini: Ottica, astronomia, relatività: Boscovich a Roma 1738-1748, *Rivista di filosofia* 71(1980), pp. 354-381.
- [8] B. Cvjetković: Rad R. J. Boškovića na polju atomistike, meteorologije i geodezije. *Spomenica Rugjera Josipa Boškovića*, Dubrovnik 1911, str. 57–80.
- [9] P. K. Čolić: Relevantna literatura o geodetskom radu Josipa Ruđera Boškovića (s bibliografijom), *Geodetski list* 42(65)(1988) 10/12, str. 285–297.
- [10] P. K. Čolić: Ruđer Bošković (1711 – 1787) als Geodät und Geophysiker, *Mitteilungen des geodätischen Institutes der Technischen Universität Graz*, Graz 1992, str. 1-164.
- [11] N. Čubranić: *Geodetski rad Ruđera Boškovića*, Zavod za višu geodeziju AGG fakulteta, Zagreb 1961.
- [12] Ž. Dadić: *Ruđer Bošković*, Zagreb 1987.
- [13] V. Dvorák: Boškovićev rad na polju fizike, *Rad JAZU* 1887–88, 87, 88, 90, str. 470–542.
- [14] H. Englefield: *On the determination of the orbits of comets according to the methods of father Boscovich and Mr. De la Place*, London 1793.

- [15] J. L. Heilbron: Meridiane and Meridians in Early Modern Science, u: Piers Bursill-Hall (ed.): R. J. Boscovich: *Vita e attività scientifica/His life and scientific work*, Roma 1993, str. 385-406.
- [16] S. Hondl: Boškovićeve računi o gustoći svjetlosti, *Glasnik matematičko-fizički i astronomski* 3(1948) 3, str. 193–200.
- [17] S. Hondl: Boškovićeve stalak, *Almanah Bošković*, 1951, str. 167–171.
- [18] S. Hondl: Boškovićeve dalekozor s vodom, *Almanah Bošković* 1952, str. 187–227; Dodatak. *Almanah Bošković* 1953, str. 81–91.
- [19] S. Hondl: Boškovićeve kružni mikrometar, *Almanah Bošković* 1955, str. 98–123.
- [20] S. Hondl: Bošković i fotometrija, *Almanah Bošković* 1956, str. 81–108.
- [21] S. Kutleša: *Filozofija Ruđera Boškovića*, KruZak, Zagreb 2012.
- [22] B. Marković: Boškovićeve staklomjer-vitrometrum. *Almanah Bošković* 1961–62, str. 193–202.
- [23] Ž. Marković: *R. J. Bošković et la théorie de la figure de la Terre*, Paris 1961.
- [24] Ž. Marković: *Ruđe Bošković 1–2*, Zagreb 1968–1969.
- [25] C. Morelli: Boscovich and Earth Sciences, u: Piers Bursill-Hall (ed.): R. J. Boscovich: *Vita e attività scientifica/His life and scientific work*, Roma 1993, str. 549-559.
- [26] M. Nikolić: Roger Boscovich et la géodésie moderne, *Archives internationales d'Histoire des Sciences* (Paris), 1961, 56/57, pp. 315–335.
- [27] K. M. Pedersen: Roger Joseph Boscovich and John Robison on terrestrial aberration, *Centaurus* 24(1980), 335-345.
- [28] E. Proverbio: Boscovich's Project for Verifying Newton's Theory on the Nature of Light, u: Piers Bursill-Hall (ed.): R. J. Boscovich: *Vita e attività scientifica/His life and scientific work*, Roma 1993, 337-362.
- [29] G. Ricchebach: *Esame imparziale della triangolazione del P G Ruggero Boscovich*, Roma 1846.

[30] G. Schuppener: Bošković als Mathematiker und Astronom, in: H. Grössing, H. Ullmaier (Hrsg.): *Ruđer Bošković (Boscovich) und sein Model der Materie*, Wien 2009, S. 41-53.

[31] V. Schiaparelli: *Sull'attività del Boscovich quale astronomo in Milano, carteggio con corrispondenti diversi (dall'archivio del R. Osservatorio di Brera a Milano)*, Milano 1938.

[32] D. Špoljarić, N. Solarić: Bošković, usavršitelj i izumitelj geodetskih, astronomskih i optičkih instrumenata, u: Miljenko Lapaine (ur.): *Ruđer Bošković i geoznanosti / Ruđer Bošković and the Geosciences*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu / Državna geodetska uprava / Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije, Zagreb 2016, str. 215-231.

[33] M. Solarić, Nikola Solarić: Boškovićeva i Maireova trigonometrijska mreža pri određivanju duljine meridijanskog luka od Rima do Riminmija, u: Miljenko Lapaine (ur.): *Ruđer Bošković i geoznanosti / Ruđer Bošković and the Geosciences*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu / Državna geodetska uprava / Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije, Zagreb 2016, str. 233-250.

[34] I. Todhunter: *A history of the mathematical theories of attraction and the figure of the Earth*, London 1873, pp. 305–334.

[35] J. Torbar: Roger Bošković i njegov rad na polju astronomije i meteorologije, *Rad JAZU* 1869, 6, str. 429–469.

[36] B. Truhelka: Geodezija Slovjenskoga juga, *Hrvatska njiva* 2(1918) 7, str. 107–109; 8, str. 127–130.

[37] D. Uvanović: Boscovich's anticipation of high densities, *Observatory* 60(1937), p. 76.

[38] A. Ziggelaar: Placing Some of Boscovich's Contributions to Optics in the History of Physics, u: Piers Bursill-Hall (ed.): *R. J. Boscovich: Vita e attività scientifica/His life and scientific work*, Roma 1993, str. 363-384.





*Milan Ivanović*<sup>1</sup>

Panon institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

E-adresa autora

panon.institut@gmail.com

## MILUTIN MILANKOVIĆ KAO GRAĐEVINSKI INŽENJER

**Sažetak:** Svjetski priznati astronom i klimatolog Milutin Milanković (1879. – 1958.) završio je građevinski fakultet u Beču, radio nekoliko godina kao građevinski inženjer na poslovima projektiranja građevina, doktorirao je na temu iz područja građevinarstva te prijavio više patenata u području armirano-betonskih konstrukcija. U radu se ukratko ukazuje na svjetski priznata postignuća u astronomiji i klimatologiji, prikazuje životni put Milutina Milankovića te detaljnije razmatra njegovo djelovanje kao inženjera. Posebno se razmatraju: Milankovićev doktorat i patenti te realizirani projekti u projektiranju i izgradnji mostova, industrijskih i aerodromskih hala te akvadukata na području pet srednje-europskih zemalja. Ukazuje se i na doprinose – kako to Milanković naziva – tehničkoj književnosti kroz seriju tekstova o inženjerskoj teoriji i praksi te povijesti tehnike.

**Ključne riječi:** Akvadukti, Građevinarstvo, Milutin Milanković, Mostovi, Projektiranje

---

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima institucije.

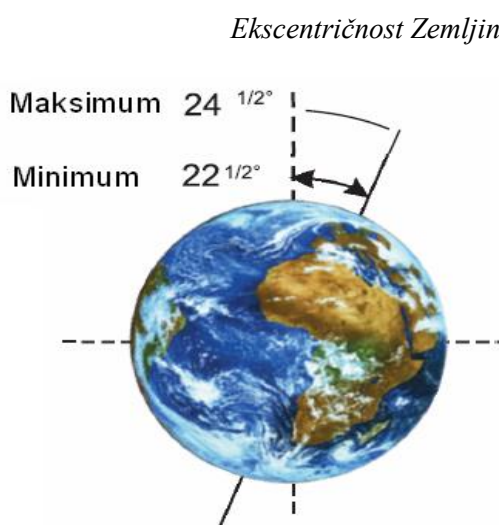
# 1. MILUTIN MILANKOVIĆ - POSTIGNUĆA U ZNANOSTI

Četiri su važna Milankovićeva doprinosa znanosti:

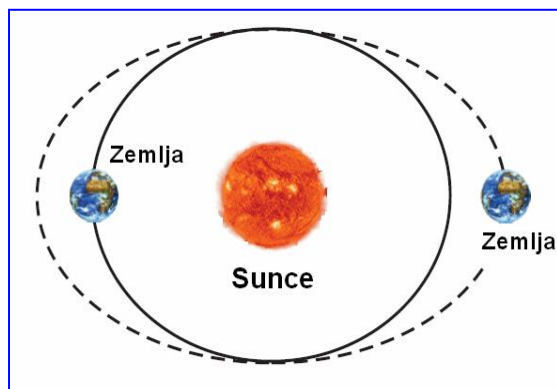
- a) Kanon osunčavanja Zemlje,
- b) Utemeljenje kozmičke klimatologije,
- c) Teorija pomicanja polova Zemlje, i
- d) Reforma Julijanskog kalendara.<sup>2</sup>

## 1.1. Kanon osunčavanja Zemlje

Istražujući utjecaj astronomskih čimbenika na klimu, tijekom geološke prošlosti Zemlje, Milutin Milanković je egzaktno objasnio razdoblja nastanka, razvoja i povlačenja glacijalnih ploča za razdoblje od 600.000 godina. Primjenjujući vlastiti matematički model i koristeći prethodna istraživanja francuskih matematičara Josepha Adhemara (1797.–1862.) i Urbaina Le Veriera (1811.–1877.), škotskog znanstvenika Jamesa Crolla (1821.–1890.) te njemačkog matematičara Ludwiga Pilgrima (1849.-1927.) Milanković je dokazao da su: (a) precesija, (b) promjena nagiba osi rotacije i (c) ekscentrična orbita Zemlje oko Sunca dominantni čimbenici promjene klime u geološkoj prošlosti našeg planeta (slike 1 - 4). Precesija rotacije Zemlje mijenja se u ciklusima od 19, 22 i 24 tisuće godina, nagib osi rotacije u ciklusima od 41 tisuću godina, a ekscentritet Zemljine putanje oko Sunca u ciklusima od 95, 125 i 400 tisuća godina. Navedeni ciklusi isprepliću se i rezultat njihova djelovanja na glacijaciju nije jednoznačan (sl. 5). Posebnu pozornost Milanković je pridao osunčavanju tla na  $55^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  i  $65^{\circ}$  sjeverne širine u ljetnom razdoblju te dokazao da je slaba osunčanost za vrijeme ljeta uzrok nastanka ledenih ploča. Vremenom je Milankovićeva teorija klime u znanosti nazvana Milankovićevi ciklusi. [1]

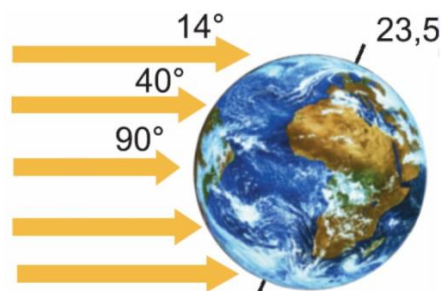


Slika 1  
Izvor: [2]

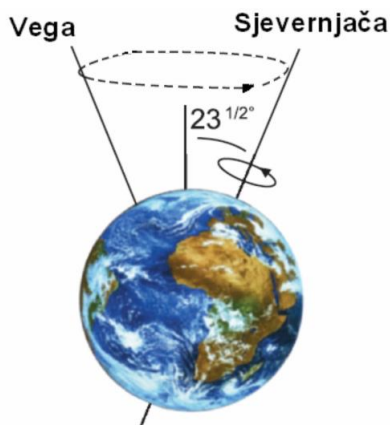


Slika 2  
*Promjena nagiba Zemljine osi rotacije u odnosu na ravan orbite*  
Izvor: [2]

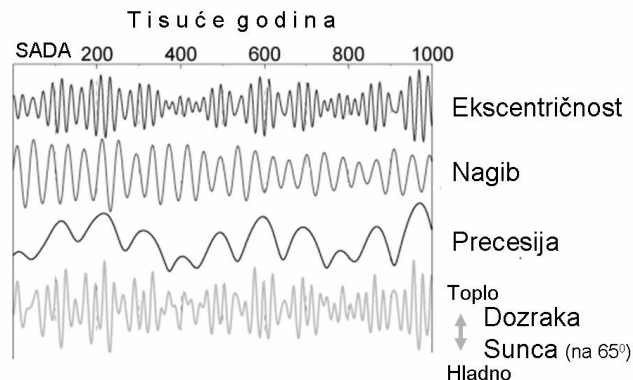
Slika 3.  
*Kut pada sunčevih zraka na površinu Zemlje*  
Izvor: [2]



<sup>2</sup> Detaljnije o znanstvenim doprinosima Milankovića vidi u našim radovima [1 - 4], [7]



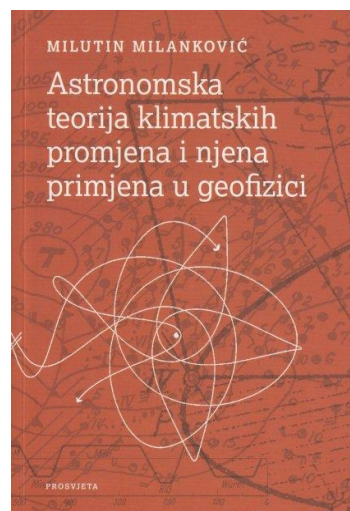
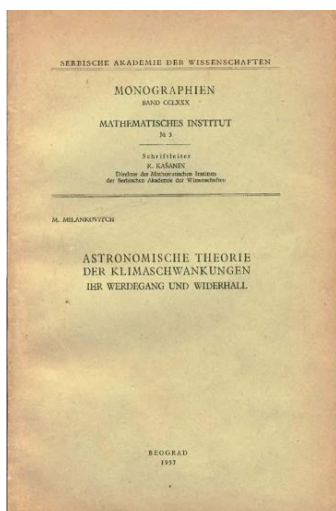
Slika 4.  
Revolucija Zemljine rotacijske osi  
Izvor: [2]



Slika 5.  
Učinak Milankovićevih ciklusa  
na osunčavanje Zemlje  
Izvor: [3]

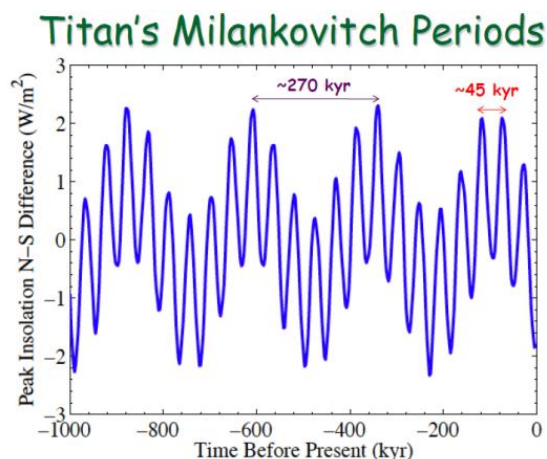
## 1.2. Utemeljenje kozmičke klimatologije

Svojim radovima o nastajanju ledenih doba na Zemlji, o klimi na Marsu i graničnim visinama atmosfere na Veneri, Merkuru, Jupiteru, Saturnu i Uranu - Milanković je utemeljio kozmičku klimatologiju. [5] [8]



Slika 6. Knjiga „Astronomska teorija klimatskih promjena i njena primjena u geofizici“ objavljena je na srpskom 1948. - na njemačkom 1959. i na hrvatskom jeziku 2009. godine

Na slici 7 je NASA grafikon Milankovićevih ciklusa za Saturnov mjesec Titan; istraživanje u okviru NASA misije „Casini“ (2004.-2006.) – što pokazuje primjenu Milankovićeve teorije u kozmičkim okvirima. [4]

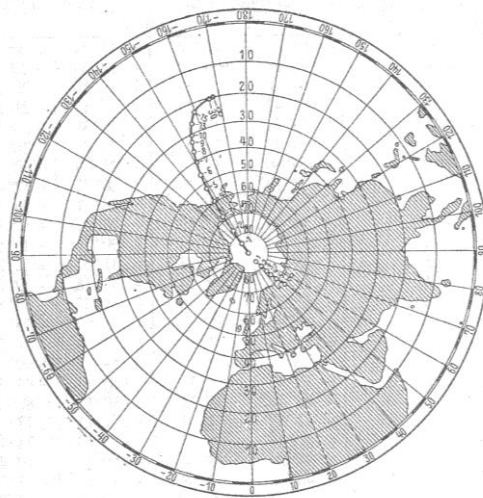


Slika 7.  
Milankovićevi ciklusi osunčavanja Titana  
Izvor: [4] [6]



### 1.3. Teorija kretanja Zemljinih polova

Milutin Milanković je jedan od tvoraca teorije tektonike kontinentalnih ploča u geologiji; na prijedlog i poticaj rusko-njemačkog klimatologa, meteorologa i botaničara Wladimira Köppena i njemačkog geofizičara i meteorologa Alfreda Wegenera razradio je Milanković numeričku sekularnu putanju polova rotacije (sl. 8) čime je dokazao da je položaj kontinenata u geološkoj prošlosti bio bitno drugačiji od suvremenog, odnosno da su se oni tijekom vremena kretali. [8]



Slika 8.  
*Sekularna putanja Zemljinog sjevernog rotacijskog  
pola prema izračunu Milutina Milankovića*  
Izvor: [8]

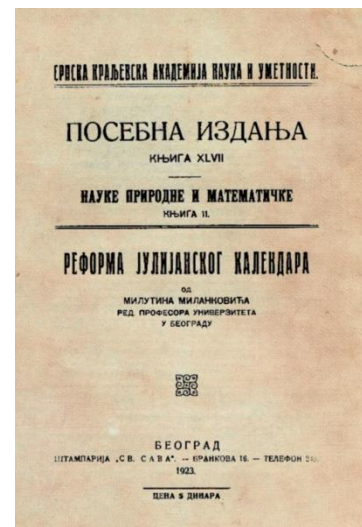
### 1.4. Reforma Julijanskog kalendara

Projekt Reformiranog julijanskog kalendara je predložen u svibnju 1923. na Svepravoslavnom kongresu u Carigradu. Predložio ga je Milutin Milanković - član delegacije Srpske pravoslavne crkve kao stručnjak za astronomiju. Naime, Milanković je bio pozvan u Ministarstvo vjera Kraljevine Srba, Hrvata i Slovenaca, gdje mu je ministar Ljuba Jovanović predočio inicijativu za promjenu kalendara, poteklu od vasiljenskog patrijarha Meletija IV. Zbog raskoraka u kalendarima kršćanskih crkava svi su veliki vjerski praznici u nizu država slavljeni dva puta; to je unosilo kulturnu pometnju i stvaralo privredne gubitke u više zemalja pa i u Kraljevini Srba, Hrvata i Slovenaca. [9]

Milankovićev koncept izmjena Julijanskog kalendara je astronomski najprecizniji kalendar do sada - koji treba korigirati tek poslije 28800 godina. „Jednostavno usvajanje Gregorijanskog kalendara u pravoslavnim crkvama nije preporučljivo ne samo zbog crkvenih pitanja već i iz znanstvenih razloga – astronomskih podataka o dužini tzv. tropske godine na kojoj se temelje Gregorijanske reforme“. [9] Milanković je predložio skraćivanje prethodnih 900 julijanskih godina za 7 dana te novo pravilo za računanje prestupnih godina. Na ovaj način Milanković je ukinuo razliku od 13 dana te u datumima izjednačio julijanski i gregorijanski kalendar, ali je postavio model izračuna kalendara koji ima manja astronomska odstupanja (od Gregorijanskog kalendara) u kretanjima Mjeseca i Sunca. Julijanski kalendar gubi svakih 128 godina jedan dan, Gregorijanski svakih 3300, a Milankovićev će zaostajati za 1 dan tek poslije više od 31000 godina. [9]

Milanković je o ovom svom pokušaju detaljno pisao u: (a) Izvještaju Srpskoj kraljevskoj akademiji po povratku s Kongresa, (b) u svojim memoarima i (c) u "Kanonu osunčavanja..." - napominjući da mu nije jasno zašto reforma, koja je jednoglasno usvojena 30. svibnja 1923. u Carigradu, i uz sve svoje prednosti, nakon toga nije primijenjena.

Revidirani julijanski (Milankovićev) kalendar su prihvatile pravoslavne crkve i patrijaršije: Carigradska, Grčka, Aleksandrijska, Rumunjska; nešto kasnije Antiohijska, Ciparska, Poljska i Bugarska crkva. Ove crkve su nazvane "novokalendarskim".<sup>3</sup>



Slika 9.  
*Knjiga „Reforma julijanskog kalendara“*  
Beograd 1923.  
Izvor: [9]

<sup>3</sup> Kalendar nisu usvojile ruska i srpska pravoslavna crkva.



Slika 10.

*Sudionici Svepravoslavnom kongresu u Carigradu 1923. godine* (Milanković – sjedi krajnje desno) [9]

## 2. ŽIVOTNI PUT MILUTINA MILANKOVIĆA

Milutin Milanković je rođen 1879. godine u Dalju, nedaleko od Osijeka, u obitelji bogatog trgovca. Privatnom podukom završava četiri razreda osnovne škole u Dalju (ispite polaže u Osijeku; 1885.-1889.), a sedmorazrednu realnu gimnaziju završava u Osijeku (1889.-1896.). U Beču diplomira građevinske znanosti (1902.) i doktorira (1904.). Više godina radi kao projektant armirano-betonskih konstrukcija u Beču (1905.-1909.). Godine 1909. prelazi na Beogradski univerzitet kao izvanredni profesor primijenjene matematike, radi u oblasti kozmičke fizike, geofizike i nebeske mehanike te osniva katedru za nebesku mehaniku. U tome razdoblju objavljuje prve radove iz primijenjene matematike i nebeske mehanike (1904.-1911.) te prve radove o astronomskim čimbenicima klime. Prvog dana I. svjetskog rata - prilikom posjete majci u Dalju – Milanković biva (kao državljanin Srbije) uhapšen, saslušan u Osijeku te interniran u logor Nesider (na granci Austrije i Mađarske) gdje je bio šest mjeseci. Iz logora je pušten na intervenciju bečkih profesora te je interniran u Budimpeštu (neka vrsta kućnog pritvora) gdje u Mađarskoj akademiji znanosti svakodnevno proučava znanstvenu literaturu iz klimatologije. Po završetku rata vraća se u Beograd, a Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti (JAZU - danas HAZU) objavljuje (1920.) Milankovićevu knjigu *Matematička teorija termičkih fenomena uzrokovanih sunčevim zračenjem* [7]<sup>4</sup>



Slika 11

*Milutin Milanković* - portret: Paja Jovanović [10]

Između dva rata Milanković ostvaruje dobru suradnju s klimatologom Wladimirom Köppenom (1846. – 1940.) i geofizičarom Alfredom Wegenerom (1880.-1930.) te objavljuje više radova i knjiga iz područja kozmičke klimatologije i nastajanja ledenih doba na Zemlji. Najznačajnije djelo iz tog vremena (1930.) je „*O primjeni matematičke teorije provođenja toplote na probleme kozmičke fizike*”. U to vrijeme postaje redovni član Srpske akademije nauka i umjetnosti (SANU), Njemačke akademije prirodnih znanosti u Halleu i dopisni član JAZU.

Uoči II. svjetskog rata (1941.) završava knjigu „*Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primjena na problem ledenih doba*“ (na njemačkom jeziku). To je njegovo kapitalno djelo koje uključuje rezultate ranije objavljenih 28 radova zajedno s novim analizama; Milanković daje astronomsku teoriju klime na Zemlji, objašnjava nastajanje ledenih doba i daje teoriju pomjeranja Zemljinih polova.<sup>5</sup> Nakon II. svjetskog rata objavio je više sveučilišnih udžbenika te je direktor Beogradske opservatorije. Umro je 1958. godine u Beogradu. [7]

<sup>4</sup> Knjiga je 1930. g. prevedena na njemački, a 1939. g. na ruski jezik.

<sup>5</sup> Knjiga je 1969. g. prevedena na engleski, 1992. g. na japanski, a 1997. g. na srpski jezik.

Slika 12.  
 Naslovnica knjige „Kanon osunčavanja Zemlje i  
 njegova primjena na problem ledenih doba“ - na  
 njemačkom jeziku - tiskana u Beogradu 1941.



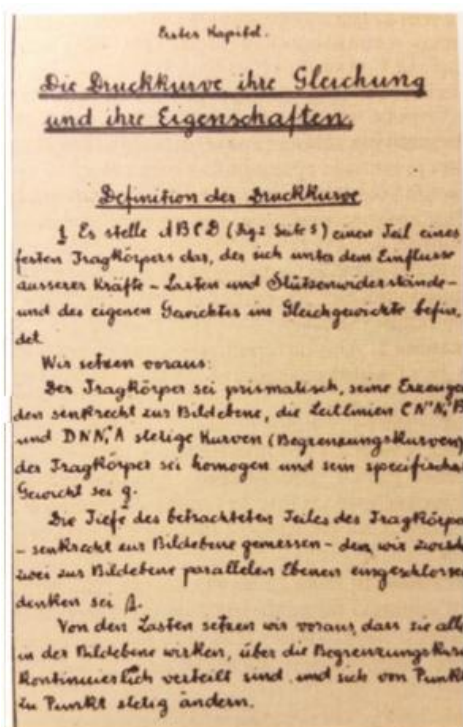
### 3. MILUTIN MILANKOVIĆ KAO GRAĐEVINSKI INŽENJER

Milanković je završio studij za diplomiranog inženjera građevinske tehnike na Visokoj tehničkoj školi u Beču; diplomski rad „Proračun čeličnog mosta“ obranio je 1.6.1902. godine. Nakon odslužene jednogodišnje vojne obveze u Habsburškoj monarhiji, 1903. godine, vratio se u Beč nastaviti doktorski studij.

#### 3.1. Doktorat

Milanković je 1904. godine (u 25. godini) obranio doktorsku disertaciju, pod nazivom ”Prilog teoriji linija pritiska” (Ein Beitrag zur Theorie der Druckkurven) koju je objavio 1907. godine u njemačkom časopisu "Zeitschrift für Mathematik und Physik" (časopis za matematiku i fiziku).

Teorija elastičnosti prevladava u primjeni za konstruiranje betonskih i kamenih svodova i lukova od sedamdesetih godina 19. stoljeća. Milanković se sa primjenom teorije linije pritiska, koja se temelji na principima elastičnosti čvrstih tijela, upoznaje tijekom studija. U to vrijeme armirani beton počeo je potiskivati željezo kao građevinski materijal zasvođenih konstrukcija, a posebno za mostove velikih raspona. Upravo je za projektiranje ovakvih konstrukcija bilo potrebno teoriju linija pritiska „podići na višu razinu“, jer pravilno određivanje linije pritiska ključno je za stabilnost građevinske konstrukcije. Milanković to ostvaruje u svojoj doktorskoj tezi; on je prvi stručnjak koji uvodi opći matematički model u problem ravnoteže konačnog lučnog elementa i napušta dotadašnju grafičku metodu za dobivanje linije pritiska betonske konstrukcije. [17]



Slika 13.  
 Rukopis Milankovićeve disertacije [12]



### 3.2. Patenti

Milanković ima priznate prijave za šest patenata u oblasti građevinarstva pomoću kojih su izgrađeni brojni objekti na području tadašnje Austro-ugarske. Ti su patentu od velikog teorijskog i praktičnog značaja; na taj način stekao je ime istaknutog izumitelja te značajnu financijsku dobit. Patentirao je novi tip rebrastih armirano-betonskih tavanica i objavio rasprave o armiranom betonu: „Prilog teoriji armirano-betonskih nosača“ i “O membrama jednakog otpora“ gdje je utvrdio da je oblik vodene kapi idealan za rezervoare za tečnost čiji zidovi imaju jednaku čvrstoću. [16]



Slika 14.

*Patentna prijava Milutina Milankovića iz 1906. godine [13]*

Tablica 1

*Prijavljeni i odobreni patenti Milutina Milankovića u oblasti građevinarstva <sup>6</sup>*

| Datum prijave | Originalni naziv patenta/Naziv na hrvatskom                                                                                                                                                 | Broj patenta |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 17.6.1905.    | Eisenbetondecke<br>Tavanica od armiranog betona                                                                                                                                             | AT25292 B    |
| 23.12.1907.   | Eisenbetondecke mit Scilfrohrbundeleinlage<br>Tavanica od armiranog betona<br>s toplotnom izolacijom od bala<br>trske, slame ili sličnog materijala                                         | AT36916 B    |
| 4.4.1908.     | Gep kotegeknek sasbol, nadbol, szalmabol es<br>hasonlo anyagokból való előállítására<br>Stroj za proizvodnju balirane trske,<br>slame ili sličnog materijala za<br>toplotnu izolaciju       | HU43572B     |
| 16.6.1908.    | Verfahren zur Herstellung hohler Eisenbetondecken<br>mit ebener Untersicht mittels Schablonen<br>Postupak za proizvodnju šupljih<br>armirano-betonskih ploča                                | AT42720 B    |
| 15.8.1908.    | Machine pour la confection de paquets de roseaux,<br>pailles, cannes et substances semblables<br>Stroj za proizvodnju balirane trske,<br>slame ili sličnog materijala za toplotnu izolaciju | FR390283 A   |
| 15.6.1909.    | Production of hollow reinforced-concrete slabs<br>Postupak za proizvodnju šupljih<br>armirano-betonskih ploča                                                                               | US 940041 A  |
| 28.5.1918     | Falszerkezet<br>Betonski zid                                                                                                                                                                | HU 73734 B   |

Izvor: [12]

<sup>6</sup> Osim u građevinarstvu Milanković ima i patent iz područja balistike; protiv-aeroplansko topovsko zrno - odobren od Vlade Kraljevine Jugoslavije 11. 5. 1933. godine; broj patenta: YU 10929 B. [14]

### 3.3. Praktičan rad

Početkom 1905. godine Milanković je primljen u poznatu bečku građevinsku tvrtku „Beton-bau-Unternehmung“ barona Adolfa Pitela, gdje je vrlo brzo dobio jedno od vodećih mjesta u konstrukcijskom birou (postavljen je na poziciju "šef inženjera"). Milanković je na toj funkciji obavljao najsloženije proračune statike za konstruiranje objekata od armiranog betona. U to vrijeme, armirani beton bio je relativno nov građevinski materijal koji se počeo sve više koristiti u svim oblastima građevine. Za manje od godinu dana po zaposlenju Milanković se dobio zadatak projektiranja velikog skladišta i tvorničke hale od armiranog betona. Polazeći od modela proračuna iz svoje disertacije Milanković je izradio proračun dimenzija armaturnih greda i nosećih ploča. Te je izračune kasnije objavio u stručnom časopisu u radu „Prilog teoriji armirano-betonskih nosača“, a koji su ušli u tehničku u literaturu i priručnike. Tih je godina projektirao i za bečko špedicijsko poduzeće „Kurmayer“ veliko skladište za koje je uradio statički proračun dimenzioniranja stupova i tavanica. Drugi rad na istu temu, a na osnovu novih rezultata objavio je 1906. godine. Na početku svoje inženjerske karijere radio je i na projektu armirano-betonskog akvadukta za hidrocentralu u Sebešu (Erdelj). Tijekom pet godina rada u bečkom poduzeću Milanković je osim navedenih objekata radio i na slijedećim objektima: rekonstrukcija zgrade Visoke tehničke škole u Beču, spremnik za vodu u Osijeku, akvadukti u Semeringu i Pitenu (kraj Beča), mostove u Banhildi, Išli i Kranju, deset hidrocentrala te hale za Krupovu tvornicu u Berndorfu. [15] [16]

Milanković je radio kao građevinski inženjer u Beču sve do 1. listopada 1909. godine, kada je prihvatio poziv za prelazak na Beogradski univerzitet na poziciju izvanrednog profesora na Katedri primijenjene matematike u okviru koje su bili predmeti Racionalna i Nebeska mehanika i Teorijska fizika. Milankovićeva plaća izvanrednog profesora bila je deset puta manja od one koju je imao kao inženjer u Beču; stoga je nastavio honorarno raditi statičke proračune u građevinarstvu i kada se preselio u Srbiju. Tako je Milanković sudjelovao u projektima na izgradnji beogradskog kanalizacijskog sustava i na izgradnji aerodromskih hangara, brana, mostova i kanala. Važan projekt koji je u to vrijeme osmislio bio je projekt prvih armirano-betonskih mostova u Srbiji. [15]

#### 3.3.1. Hale

Prvi Milankovićev rad u tvrtki barona Pitela bio je tvornički objekt u St. Pöltenu, gdje je Milanković na 15.000 m<sup>2</sup> uradio rekonstrukciju krova, primjenjujući prvi put dvostruko armirane betonske presjeke za koje je izveo i osnovne jednadžbe.<sup>7</sup> U to vrijeme armirani beton je bio nov građevinski materijal i Milanković je bio među prvim stručnjacima koji su uveli matematičko modeliranje, napustivši dotadašnji grafički način projektiranja.

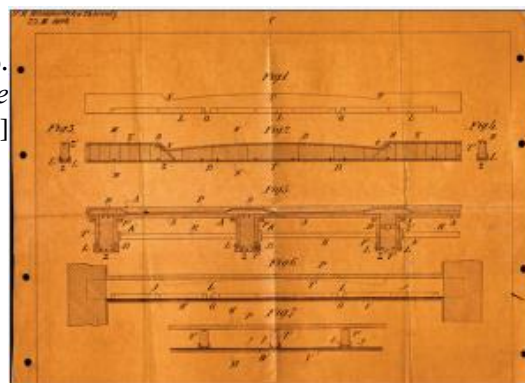


Slika 15.  
*Nadgledanje izvođenja tavanice u tvorničkom objektu od strane predstavnika poduzeća barona Pitela [12]*

<sup>7</sup> Da to nije bio običan građevinski posao pokazuje i poziv pisca Empergera, autora „Enciklopedije armiranog betona“, Milankoviću da napiše rad o toj rekonstrukciji. U nedostatku vremena Milanković je zamolio svog kolegu Karl von Tercagija, člana njegove škole statike betonskih konstrukcija, da napiše taj članak. Tercagi je kasnije postao jedan od najpoznatijih profesora geomehanike u Sjedinjenim Američkim Državama. [18]



Slika 16.  
Milankovićev crtež patentirane tavanice  
od armiranog betona [12]



Slika 17.  
Tavanica izgrađena po Milankovićevom patentu [18]



Slika 18.  
Milutin Milanković (sjedi dole lijevo) kao inženjer u  
nadzoru izgradnje aerodroma u Skoplju 1933. [18]

Nakon Prvog svjetskog rata Inženjersko odjeljenje Komande zrakoplovstva Kraljevine Jugoslavije angažira Milutina Milankovića za projektiranje i nadzor izgradnje aerodromskih hangara u Beogradu, Novom Sadu, Kraljevu, Mostaru, Pančevu, Sarajevu, Skoplju i Zemunu. Prema projektnom rješenju inženjera Milankovića 1931. godine izgrađen je u aerodromu Beograd hangar betonske konstrukcije s radioničkim aneksima koji je služio za montažu i popravak zrakoplova (sl. 19) - koji je sačuvan do danas. Ovdje su prvi put u svijetu upotrijebljene osnovne jednadžbe za određivanje armature betonskih oslonaca. [15][19]



Slika 19.  
Hangar-radionica; unutrašnjost hangara beogradskog  
aerodroma [19]



Slika 20.  
Milutin Milanković (u sredini sa štapom) u nadzoru  
izgradnje beogradskog hangara 1931. godine [19]

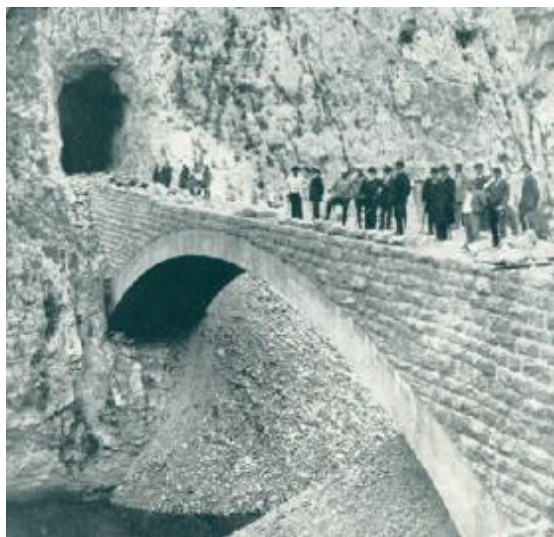
### 3.3.2. Mostovi

Milanković je bio angažiran i na izgradnji vijadukta u Hirshvangu (Zemering) 1906. godine (sl. 21) i u Pittenu kod Beča 1907. godine

Godine 1912. (kada je već sa službom u Beogradu) Milanković je prihvatio poziv Petra Putnika, vlasnika građevinske tvrtke, svog kolege sa studija u Beču, da izradi projekte mostova od armiranog betona u rasponu od 30 m na rijeci Timok na trasi pruge Niš – Knjaževac. Milanković je izradio statički izračun za sve mostove. K tome - Milanković je nazočio i sudjelovao u izgradnji prvog mosta kod Svrlijiga (sl. 22), gdje se operativno uključuje u posao i brine o tome kako se „beton miješa, raspoređuje po oplati i nabija“. [12]



Slika 21.  
*Vijadukt u Zemeringu danas [18]*



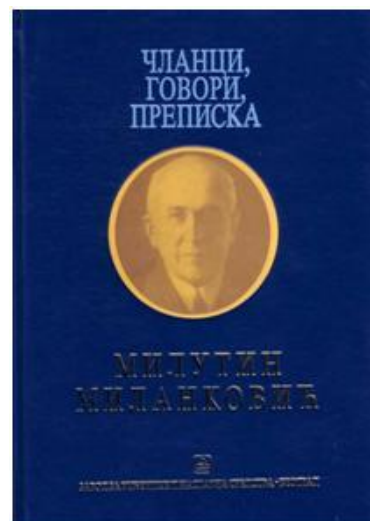
Slika 22.  
*Most na pruzi Niš-Knjaževac u doba izgradnje [12]*

### 3.3.3. Akvadukti

U toku svog inženjerskog rada u Austrougarskoj Milanković je sudjelovao svojim statičkim izračunima i radom na terenu u izgradnji ukupno deset hidrocentrala, među kojima se posebno ističe ona izgrađena u Milbahu - u oblasti Erdelj (današnja Rumunjska); ovdje je konkretan zadatak Milankovića bio projektirati armirano-betonski akvadukt dužine 1.200 m kojim se voda od brane dovodi do turbina hidrocentrale. [15]

### 3.3.4. Tehnička književnost

Milutin Milanković je pored znanstvenog doprinosa na području astronomije i klimatologije te realizaciji praktičnih projekata u građevinarstvu dao značajne doprinose i – kako to Milanković naziva – tehničkoj književnosti kroz seriju tekstova o inženjerskoj teoriji i praksi te povijesti tehnike. U tablicama 2 i 3 daje se pregled naslova stručnih i znanstvenih radova iz područja tehnike, posebno građevinarstva, objavljenih u više časopisa, a potom skupljenih u dvije knjige (od sedam knjiga) izabranih djela Milutina Milankovića.



Slika 23.  
*Peta knjiga izabranih djela Milutina Milankovića*

Tablica 2

Objavljeni stručni i znanstveni radovi Milutina Milankovića iz područja tehnike  
– ČLANCI, GOVORI, PREPISKA - izabrana dela, knjiga 5,  
Zavod za udžbenike i nastavna sredstva , Beograd 1997.

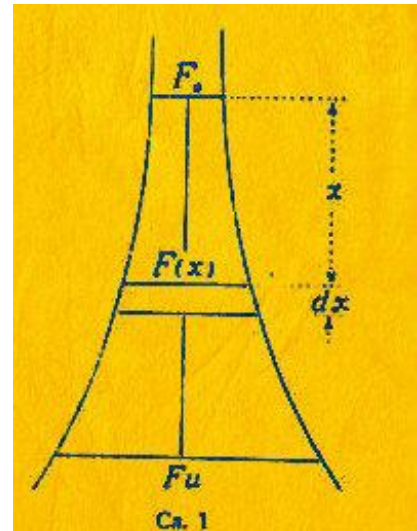
|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PRVI ARMIRANO BETOSNKI MOSTOVI U PREDRATNOJ SRBIJI                                                          | 121 |
| TEHNIKA U TOKU DAVNIH VEKOVA                                                                                | 131 |
| Uvod                                                                                                        | 133 |
| Tehnika nepisana istorija prvobitnog ljudskog društva                                                       | 135 |
| Čovek ulazi u tajne prirode                                                                                 | 144 |
| Grci izgrađuju egzaktnu nauku do monumentalne visine                                                        | 153 |
| Tehnika starih naroda do prevlasti rimske države                                                            | 162 |
| Tehnika i snaga rimske države                                                                               | 185 |
| Sumrak nauke u srednjem veku                                                                                | 200 |
| Monumentalne građevine srednjeg veka                                                                        | 208 |
| Na pragu nove civilizacije                                                                                  | 218 |
| NAUKA I TEHNIKA TOKOM VEKOVA                                                                                | 223 |
| Uvod                                                                                                        | 229 |
| Najstariji tragovi ljudskog roda                                                                            | 232 |
| Počeci istorijskog doba i naučnih saznanja                                                                  | 237 |
| Grci polažu temelje racionalnim naukama                                                                     | 242 |
| Aleksandrijska škola                                                                                        | 248 |
| Srednji vek i prelaz u novi vek                                                                             | 225 |
| Doba Galileja i Keplera                                                                                     | 252 |
| Isak Njutn                                                                                                  | 256 |
| Pronalasci dobiveni posmatranjem i eksperimentom                                                            | 262 |
| Francuska revolucija i naučnici toga doba                                                                   | 266 |
| Fizika i hemija u tehnici                                                                                   | 271 |
| Primene nauka u tehnici                                                                                     | 277 |
| Pregled naučnika i pronalazača navedenih u ovoj knjizi<br>poredanih po godinama njihovih glavnih dostignuća | 283 |

Tablica 3

Objavljeni stručni i znanstveni radovi Milutina Milankovića iz područja tehnike  
- USPOMENE, DOŽIVLJAJI, SAZNANJA - izabrana dela, knjiga 6  
Zavod za udžbenike i nastavna sredstva , Beograd 1997.

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| INŽENJERSKA TEORIJA I PRAKSA                                                   | 21 |
| Prilog teoriji krivih pritisaka (doktorska disertacija)                        | 23 |
| Tehnička književnost                                                           | 54 |
| Najracionalnija konstruktivna visina i razmak rebara<br>kod Enebikove tavanice | 56 |
| O membranama jednakog otpora                                                   | 62 |
| Rodoslov armiranog betona                                                      | 72 |
| Vavilonski toranj moderne tehnike                                              | 76 |

Posebnu pažnju treba ovdje ukazati na članak „Vavilonski toranj moderne tehnike“ kojem Milanković matematičkim jezikom opisuje teorijski najvišu moguću građevinu od armiranog betona na Zemlji. Zamislio je građevinu sazdanu od betona, poluprečnika osnove 112,84 km i visine 21,646 km (slika 24), a što predstavlja teorijsku granicu visine koja se zbog građevinske statike ne može prekoračiti. Toranj bi imao široku platformu na vrhu za meteorološku i astronomsku opservatoriju.



Slika 24.  
Milankovićeva skica Babilonskog tornja [15]

## ZAKLJUČAK

Svjetski poznat znanstvenik Milutin Milanković (Dalj 28.5.1879 – Beograd 12.12.1958) - priznat po svojoj teoriji klime, kozmičkoj klimatologiji, teoriji kretanja polova Zemlje i reformi julijanskog kalendara - ostavio je vrlo značajne doprinose i kao građevinski inženjer.

Započevši stručnu karijeru kao građevinski inženjer u Beču istakao se inovativnim rješenjima u građevinskim konstrukcijama, primjeni vektorskog računa u mehanici, primjeni armirano-betonskih rješenja u izgradnji niza hala, akvadukata i mostova. Ovi su objekti izgrađeni u pet europskih zemalja - Austriji, Italiji, Jugoslaviji, Mađarskoj i Rumunjskoj. Milanković je zapažene doprinose dao i u tzv. tehničkoj književnosti - stručnim i znanstvenim radovima iz područja građevinarstva i povijesti tehnike. I u kasnijem razdoblju radnoga vijeka – već kao znanstvenik svjetskog ranga – Milanković je radio na projektiranju i provedbi građevinskih projekata, a priloge tehničkoj književnosti davao je i u umirovljeničkim godinama.

Milutin Milanković je umro 12. 12. 1958. godine u Beogradu, a po vlastitoj želji njegovi posmrtni ostaci su preneseni u Dalj - gdje počiva u obiteljskoj grobnici.

## Literatura

- [1] M. Ivanović (2012.), Milutin Milanković (1879 – 1958) – One of the Most Significant Scientists of 20<sup>th</sup> Century, 1<sup>st</sup> International scientific conference „Economy of Easter Croatia“, Osijek, May 20, 2012. Proceedings, ISBN 978-953-253-106-0, pp 326-335
- [2] M. Ivanović (2009.), Tri eseja o znanosti - drugo dopunjeno i prošireno izdanje; ISBN 978-953-6032-55-6226, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2009.
- [3] M. Ivanović (2009.), *Millennium Scientific Paradigm and Climate Millennium Intervention*, 9<sup>th</sup> International Conference VIPSI, Beograd, 2-4. April, Elektrotehnički fakultet Beograd; Proceedings, pp 16.1.-16.6
- [4] M. Ivanović (2013.), Djelo Milutina Milankovića (1879. – 1958.) među najznačajnijim znanstvenim postignućima XX. stoljeća  
<http://www.panon.eu/tekst/hr/79/28%20Milankovic%20HAZU.pdf>  
(preuzeto 23. 03. 2023.)
- [5] \* \* \* (2012.), [https://www.znanje.org/i/i28/08iv03/08iv0326/naucni\\_radovi.htm](https://www.znanje.org/i/i28/08iv03/08iv0326/naucni_radovi.htm)  
(preuzeto 23. 03. 2023.)
- [6] NASA (2012.), [http://saturn.jpl.nasa.gov/files/20101130\\_CHARM\\_Aharonson.pdf](http://saturn.jpl.nasa.gov/files/20101130_CHARM_Aharonson.pdf)  
(preuzeto 9. 9. 2009.)



- [7] M. Ivanović, Đ. Nešić (2018.), Milutin Milanković (1879. - 1958.) u austrijsko – njemačkom kulturnom krugu, 26. simpozij „Nijemci i Austrijanci u hrvatskom kulturnom krugu“ Osijek, 23.-25. studeni 2018. / Njemačka zajednica - Zemaljska udruga Podunavskih Švaba u Hrvatskoj - Osijek, Zbornik, ISSN 1331-7172; str. 187-203
- [8] M. Milanković, Kanon osunčavanja Zemlje, izabrana dela, knjiga 2, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva u Beogradu, 1997.
- [9] M. Milanković, Reforma Julijanskog kalendara, Srpska kraljevska akademija nauka i umetnosti, Beograd 1923.
- [10] Portret Milutina Milankovića [https://sr.wikipedia.org/sr-el/%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BD\\_%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%9B](https://sr.wikipedia.org/sr-el/%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BD_%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%9B) (preuzeto 23. 3. 2023.)
- [11] Kulturno znanstveni centar Milutin Milankovic Dalj <https://www.milutin-milankovic.com/kulturni-i-znanstveni-centar-milutin-milankovic/>
- [12] Mirjana D. Jelić, Zajedničke karakteristike glavnih doprinosa Ruđera Boškovića, Milutina Milankovića i Branka Žeželja razvoju građevinarstva Integritet i vek konstrukcija, Vol. 17, br. 2 (2017), str. 157–169
- [13] Aleksandar Petrović, Revolution and Insolation How Milutin Milanković has Assembled the Puzzle of the Climate, Scientific Technical Review, Vol.LIX, No.1, 2009
- [14] [https://sr.wikipedia.org/sr-el/%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BD\\_%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%9B](https://sr.wikipedia.org/sr-el/%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BD_%D0%9C%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%9B)
- [15] Milanković, M., Članci, govori, prepiska – *izabrana dela, knjiga 5*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva u Beogradu, 1997.
- [16] Milanković, M., Uspomene, doživljaji i saznanja, – *izabrana dela, knjiga 6*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva u Beogradu, 1997.
- [17] Naerlović-Veljković, N, Milutin Milanković-delatnost u građevinarstvu, Razvoj nauke u oblasti građevinarstva i geodezije u Srbiji, st.483-498, Ed. M. Sekulović i R. Mandić, Građevinski fakultet Beograd, 1996.
- [18] Dragoslav Šumarac, Milutin Milanković (1879-1958) prvi doktor tehničkih nauka među Srbima, Izgradnja 63 (2009) 7-8, 345-348
- [19] Biljana Mišić, Hangar starog aerodroma - svedočanstvo prvog aerodroma u Beogradu, Spomeničko nasleđe 2014/01



*Zlatko Lacković*

Panon-Institut za strateške studije, Osijek

zlackovic@gfos.hr

## **SIMBIOZA OBITELJI GUTMAN I INDUSTRIJSKOG RAZVOJA U BELIŠĆU**

**Sažetak:** U svakom uspješnom, osobito gospodarskom, procesu je temeljni čimbenik uspješnosti pojedinac ili tim s razvojnim pojedincem na čelu. U ovom se slučaju radi o industrijskom razvoju u Belišću i okolini te sudjelovanja poznate obitelji Gutman u tim procesima. Sadržajno se prikazuje dolazak Salamona Gutmana u Belišće i njegova vizija koja je temeljena šumskim i poljoprivrednim bogatstvom Slavonije te tržištem cijele Europe. U tome razvoju je obitelj Gutman u različitim društvenim i političkim promjenama nailazila na različite kulturološke, monetarne i financijske poteškoće kao i ratove. Salamon Gutman te njegovi sinovi i unuci, su to uspješno prevladavali pa je Belišće tijekom stotinjak godina od kraja 19. i polovine 20. Stoljeća, postalo poznato industrijsko mjesto. Konačno je nakon II. Svjetskoga rata, na temelju povijesne baštine obitelji Gutman, Belišće postalo mjesto respektabilne industrije. Nakon najnovije promjene devedesetih godina prošlog stoljeća obavljena je pretvorba i privatizacija. Nakon toga danas Belišće ima razvijeno gospodarstvo na temelju osnivanja više malih poduzeća uz pomoć stranih ulaganja i razvojne politike nositelja gradskih vlasti. Kao trajna potpora je i baština industrijskog razvoja obitelji Gutman.

**Ključne riječi:** Gutman, industrija, željeznica, Belišće, razvoj

## Uvod

Opće je poznato da iza svake uspješne aktivnosti u bilo kojoj vrsti djelatnosti stoji pojedinac ili vođa tima. To se osobito odnosi na gospodarsku djelatnost, što je premet ovoga razmatranja. Kao glavni sudionik je personificirana poznata obitelj Gutman iz Belišća. Posebno je zanimljiva činjenica da su svi nositelji industrijskog razvoja iz obitelji Gutman u Belišću imali različite poteškoće. To se posebice događalo prilikom ratova i drugih promjena društvenog, političkog i gospodarskog sustava.

Već sam dolazak Salamon Gutmana u vrijeme Austro-ugarske monarhije bio je rizičan ali hrabar potez pojedinca da na nepoznatom terenu pokrene poslovnu aktivnost. Razlog za optimizam su mu posebice dale slavonske šume bogate hrastovinom i ostalim korisnim drvećem. Naravno da je razlog za dolazak povećan saznanjem o velikim obradivim količinama poljoprivrednog plodnog zemljišta. Na temelju takvih argumenata Salamon Gutman je još krajem devetnaestog stoljeća krenuo u investiranje. Za sjedište je odabrao predio današnjeg Belišća zbog bogatstvo šuma i poljoprivrednog zemljišta ali i zbog rijeke Drave koja je u to vrijeme omogućila plovni pristup Europi.

Posebnu potporu su Salamon Gutmanu pružile financijske institucije ali su njegove razvojne ideje osobno prihvatili sinovi Edmond, Vilim i osobito Aladar. To je omogućilo daljnji industrijski razvoj ali i prevladavanje poteškoća koje su naišle već ulaskom te krajeve u novu državu SHS nakon I. svjetskog rata. To je bio za obitelj Gutman financijski, gospodarski, monetarni i kulturološki šok. Sve su to Gutmanovi prevladali pa je nakon I. svjetskog rata uslijedio veliki raznovrsni industrijski razvoj temeljen sirovinama iz slavonskih šuma i uspostavljenim europskim i svjetskim tržištem. U cilj uspješne nabave sirovina izgrađena je i uskotračna željeznica koja je uz prijevoz materijala sve više služila i za prijevoz putnika pa tako doprinosila boljoj komunikaciji stanovništva u tim krajevima.

Nova poteškoća nastaje početkom II. Svjetskog rata kada Gutmanovi ostaju bez vlasništva i bilo kakvog upravljačkog utjecaja. Pravim čudom su, s obzirom na židovsko podrijetlo, sačuvali živote, te sudjelovali u opstanku poduzeća u ratnim uvjetima. Bez obzira što postoje određene informacije o tihoj suradnji s partizanima, preostali članovi obitelji osobito inženjer barun Viktor Gutman, doživjeli su tragični sudbinu.

Nakon II. Svjetskog rata na temeljima očuvanog industrijskog pogona, nastalo je novo poduzeće koje je koristeći tehnologiju i tradiciju iz prošlosti, postalo novi industrijski kompleks pod nazivom „Kombinat Belišće“. Taj složeni sustav je uspješno poslovao i zapošljavao 4-5 tisuća zaposlenika do

1990. godine. Nakon pretvorbe vlasništva i privatizacije nastalo je više manji poduzeća i nekoliko poduzetničkih zona. Tome razvoju su posebni doprinos pridonijeli strani ulagači koju su prepoznali tradiciju i spremnost te okoline za rad i razvoj. Naravno da je i razvojna baština obitelji Gutman, bila i ostala trajna marketinška potpora, sadašnjeg i budućeg razvoja industrije u Belišću.

## 1. Obitelj Gutman iz Belišća

Gutman, Salamon Heinrich, bio je gospodarstvenik, rođen u Gelse-Mađarska 1806. a umro 1902. godine. Poslovnu karijeru je započeo kao skladištar kod imućnog trgovca plodinama Lazara Stroaszeraua u Nagykanizsi-Mađarska. Nakon što se oženio s kćeri od svoga poslodavca naslijedio je i poslovanje te utemeljio tvrtku „S.H. Gutman,, d.d. Nakon toga je stekao naklonost bečkoga dvora uplativši veliku donaciju. Taj čin je pospješio napredovanje firme a dekretom cara Franje Josipa S.H. Gutman je postao plemić s naslovom „ Gutman de Gelse „. Nakon što je 1878 godine na izložbi u Parizu izložio prvu bačvu od 1000 hl, dobio je Viteški križ Legije časti. U braku je imao devetoro djece a veću ulogu u kasnijem razvoju imali su sinovi Edmund, Vilim i Aladar. [6]



Sl.1. Sinovi Salamona Gutmana, sjede slijeva: Edmund, Vilim i Isidor, stoje slijeva: Ladislav i Alfred [6]



Obitelj je nastavak razvoja temeljila novim investicijama odnosno modernizacijom. Zbog toga su članovi obitelji ukazom cara Franje Josipa I. odlikovani titulama baruna ali uz naziv „de Belišće“.

Od Gutmanovih potomaka, glede razvoja industrije posebno se mogu istaknuti sinovi Aladar, Vilim, Izidor i Edmond. Gutmanov sin Edmond bio je gospodarstvenik koji je u Beču s mlađim bratom osnovao trgovačko poduzeće „Edmund & Izidor Gutman“. Ta firma se bavila s plasmanom proizvoda iz Belišća širom Europe. Osim toga je sa svojim financijskim krugovima, omogućio tvrtki u Belišću povoljne uvjete za financiranje novih projekata. Sin Vilim se bavio sa bankarstvom u Budimpešti što je također omogućilo tvrtki u Belišću lakši kontakt s evropskim financijskim institucijama a time i financiranje razvoja poduzeća u Belišću. Od svih sinova S. H. Gutmana najviše je u proizvodnji i razvoj tvrtke bio uključen sin Aladar s svojim sinovima. Aladar je bio strojarski inženjer koji se brinuo za modernizaciju pogona u Belišću te za izgradnju i održavanje željezničkih pruga. Imao je tri sina; Ernest, Otto i Viktor. Najeksplozivniji u radu i razvoju poduzeća je bio inženjer Viktor Gutman koji je tvrtku uspio održati i za vrijeme II. Svjetskog rata da bi ga bez objektivnih dokaza komunistički režim likvidirao.

## **2. Početak industrijalizacije u Belišću**

Slavonija i Baranja pa tako i današnji prostor koji zauzima grad Belišće bilo je područje pretežno pod šumama ili oranicama u vlasništvu poznate vlastelinske obitelji Prandau. To je iskoristio Salamon Gutman i 1836. kupio 41 000 jutara šume. Obitelj Gutman proširila je svoje poslovanje u Hrvatsku a na području Belišća godine 1884. izgradila je pilanu sa osam gatera a zatim tvornice bačava i tanina te kotlovnice i dvije sušare. Iz tih prvih dana povijesti Belišća i gradnje pilane stoji podatak kako je graditelj pilane bio izvjesni strojarski inženjer Josip Schrittwieser. Zgrada pilane je za ono vrijeme građena gotovo umjetnički, a prilikom njezine gradnje trebalo je riješiti i pitanje opskrbe vodom postrojenja. Problem je privremeno riješen tako što se voda za napajanje kotlova crpila iz bunara, specijalno iskopanih za tu namjenu, no zbog pomanjkanja vode, odnosno presušivanja bunara, često će dolaziti do zastoja u radu pilane. Schrittwieser će, suočen s nemogućnošću rješavanja tog problema, izvršiti samoubojstvo. Sve zgrade izgrađene su preko ljeta 1884. godine. Tada se radničko naselje sastojalo od šest kuća za namještenike, pogonsko i radno osoblje, kantine itd. Godine 1900. počeo je raditi pogon suhe destilacije drva a 1900. remontna radionica, 1902. tvornica parketa, 1906. kamenolom; zgrada kemijskog laboratorija tvornice tanina dograđena je 1909. [7])

Od 1884. do 1910. nastupilo je razdoblje investicijskog ulaganja u proizvodne kapacitete i infrastrukturu, te širenja šumskoga veleposjeda. Godine

1900. izgrađen je pogon suhe destilacije drva, 1900. remontna radionica, 1902. tvornica parketa, 1906. kamenolom te zgrada kemijskog laboratorija a tvornice tanina dograđena je 1909. Radi transporta drva, uskotračna pruga duga 16 km puštena je u promet 1884, a do 1908. poduzeće je izgradilo 180 km uskotračne pruge za javni promet.



Sl. 2. Tvornica S. H. Gutmann Beliše, početak XX. st. [8]

God. 1900. Tvrtka S. H. Gutman imala je 60 910 jutara šume i zemlje i razvila drveno prerađivačku industriju. Radi eksploatacije drva u istočnoj je Slavoniji proširila mrežu uskotračnih željezničkih pruga i njezina je *Slavonsko-podravska željeznica d.d.*, služeći i putničkom prometu, nadoknađivala pomanjkanje državnih pruga. Svoje proizvode, osobito bačvarske dužice i drvo za brodogradnju od slavonskog hrasta lužnjaka, tvrtka je izvozila i u prekooceanske zemlje. Njezino neracionalno iskorišćivanje šuma ozbiljno je bilo ugrozilo slavonske hrastove šume.

### 3. Prvi svjetski rat i poraće

Tijekom I. svj. rata poduzeće je radilo sa smanjenim kapacitetom. Nakon propasti Austro-Ugarske Monarhije postalo je jedan od najvećih, tehnološki najsloženijih i najnaprednijih drvnih kombinata u Kraljevini SHS. Poduzeće S. H. Gutman su u to vrijeme, kao i većine firmi s područja Austro-Ugarske monarhije zahvatile dvije nepogode i to: monetarna i nacionalizacija. Naime u to vrijeme je ova tvrtka kao i ostale egzistirala u jednoj uređenoj visoko razvijenoj monarhiji a 1918. godine se našla u jednoj od najnerazvijenijih i kulturno najzaostalijih kraljevina. Monetarna nepogoda je pogodila tvrtku prilikom zamjene Austro-ugarskog novca za dinare i to po višestrukoj vrijednosti u korist dinara. Osim kulturološkog šoka koji su doživjeli svi narodi

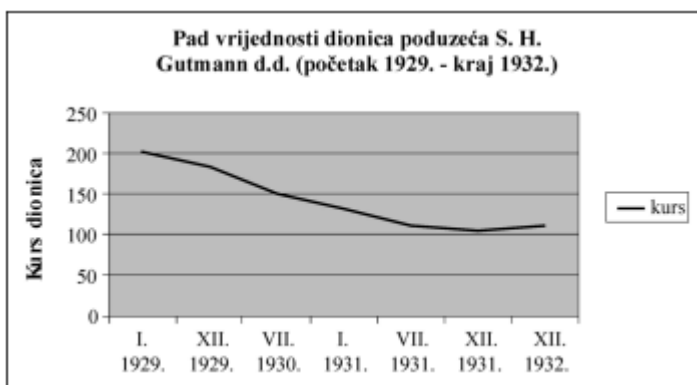
koji su uključeni u novu državu SHS tvrtki „S. H. Gutman“ je prijetila i nacionalizacija. Kako bi izbjeglo nacionalizaciju, 1918. Poduzeće je najprije pretvoreno je u dioničko društvo. Sjedište poduzeća preseljeno je u Belišće, a poslovalo je pod nazivom S. H. Gutmann d. d. Belišće te kako bi izbjegli nacionalizaciju, sjedište tvrtke potkraj 1918. preneseno u Belišće, a prodajni uredi zadržani u Mađarskoj i Beču.

Posebno treba pripomenuti da su se početkom dvadesetog stoljeća u posao uključili i sinovi. Tako je tvrtka u Trstu, gdje je Salamonov sin *Edmund* (1841–1918) živio, imala je izvoznu podružnicu. Drugi sin *Artur* razvio je prodajnu središnjicu u Budimpešti, a povremeno je živio u Belišću, gdje mu je otac dao izgraditi 1905. palaču »Palej« koja je poslije služila za upravne poslove. Edmundov brat *Vilim* osigurao je tvrtki solidnu financijsku osnovu i organizirao sudjelovanje na međunarodnim izložbama. Njihov brat *Aladar*, strojarski inženjer, brinuo se za modernizaciju pogona u Belišću te za izgradnju i održavanje željezničkih pruga. Njegovi su se sinovi, *Ernest*, *Otto* i *Viktor*, također bavili poslovima te vodili tvrtku do 1941. U tom razdoblju došlo je do stagnacije u proizvodnji i prodaji zbog gospodarske krize i tehnološke zastarjelosti, pa je poduzeće bilo prisiljeno na preorijentaciju (nova proizvodnja briketiranoga drvnog ugljena, proizvodnja kestenova taninskog ekstrakta i dr.) i modernizaciju. Tako je npr. 1920-ih tvornica imala proizvodni kapacitet suhe destilacije oko 5000 t drvnog ugljena, 1500 t kalcijevog acetata, 700 t octene kiseline, 120 t formalina, 40 t kloroforma, 120 t natrijevog acetata, 40 t olovnog acetata, 2100 t katrana i 550 t smole.



Sl. 3. Tvornica Belišće d.d., prva polovina XX. st.[9]

U razdoblju između dva svjetska rata Gutmanovi su uspjeli prevladati i druge poteškoće. Kao što je poznato u razdoblju od 1929. do 1932. godine cijeli svijet zahvatila je ekonomska kriza koja je utjecala i na poslovanje firme „S.H. Gutman d.d.“ u Belišću. Prije svega je smanjen izvoz ogrjevnog drveta kao i drvene građe te ostalih proizvoda od drveta. U takvoj situaciji došlo je do pada vrijednosti u tvrtki kako to pokazuje tablica 1.



Tablica 1. Kurs dionica tvrtke „S.H. Gutman“ u razdoblju od 1929-1932 godine [3]

Gutmani su pratili i osjetili probleme na stranom tržištu, tako da su se pripremili za krizu te prije svega sačuvali kvalificiranu radnu snagu tako da je firma 1928. zapošljavala 3187 a 1930. godine 2264 radnika. Otpustom sezonskih radnika i djela službenika je povećana proizvodnost poduzeća. Zbog redukcije poslovanja radilo se manje dana u tjednu. Povećanjem konjunktura 1933. godine vraćeno je na posao 899 radnika i 89 službenika. [4]

#### 4. Poduzeće „S. H. Gutman d.d. Belišće“ u vrijeme II. Svjetskog rata

Tijekom II. svj. rata poslovanje je stagniralo zbog podređenosti gospodarstva državi. To znači da je kompletna imovina zapravo oduzeta a preostali članovi obitelji, osobito Viktor Gutman, bili su izvršni rukovoditelji bez ikakvog vlasničkog utjecaja. Za NDH imovina poduzeća bila je podržavljena, a 1941.–

45. poslovalo je pod imenom *Šumsko vele obrtno d. d. Belišće*. Zahvaljujući uspješnom poslovanju, osobito u razdoblju 1935-1941 pogoni firme „S. H. Gutman d.d. Belišće“ je dočekalo II. svjetski rat na zavidnoj tehnološkoj razini i velikoj vrijednosti. Pogoni poduzeća su bili locirani uglavnom u Belišću kao primjerice:

- Velika parna pilana koja je opskrbljivala preko 100 mjesta sa građevnim i ogrjevnim drvom. Uz pilanu je bila tvornica parketa sa strojevima kapaciteta oko 80 000 m<sup>2</sup> godišnje.
- Tvornica tanina je posjedovala deset strojeva za usitnjavanje, 19 parnih crpki te pogon turbogenerators. Kapacitet tvornice je iznosio 600 vagona tanina godišnje.
- Uspješno je nastavljena proizvodnja bačava za vlastite potrebe kao ambalaža za tanin.
- Tvornica suhe destilacije za kemijsku preradu drveta i proizvodnju: octene kiseline, acetona, metilnog alkohola, formaldehida, raznih ulja i otapala, katrana i retortnog ugljena.
- Poseban pogon za popravak postrojenja te željezničkih strojeva i vagona, ljevaonicu željeza kao i servisne radionice za održavanje tvorničkih uređaja i instalacija.[2]

Poduzeće je posjedovalo, osim pogona u Belišću, kamenolom, ribnjake, poljoprivredno dobro i niz manjih pogona i pilana na terenu. Svi pogoni poduzeća bili su povezani sa Slavonsko-podravskom željeznicom u vlasništvu poduzeća.

Prema navedenom izvoru to veliko i uspješno poduzeće je uspostavom NDH 1941 godine došlo u novi pravni i gospodarski položaj. Kako je već napomenuto upravljanje svim pogonima i cjelokupnim kapitalom je bilo u ovlasti povjerenika te je i sam naziv promijenjen u „Šumsko vele obrtno d.d.“. Proizvodnja u ratnim uvjetima se stalno smanjivala kao i broj radnika osobito na terenu. Tako je već u prvoj ratnoj godini pogoni radili sa kapacitetom od 75% a u narednom ratnom razdoblju je kapacitet smanjen na 50%. Osnovni uzroci su bili sve veći nedostatak sirove građe zbog ratnih uvjeta u šumskim predjelima. Zbog sve većeg preuzimanja teritorija od strane partizanskog pokreta poduzeće sužavalo proizvodnju a kada je i samo poslovanje bilo ugroženo, uprava poduzeća je krajem rata tražila od državnih organa prebacivanje sjedišta u Zagreb.

Barun Viktor Gutman sa obitelji je ostao u Belišću te svojom strukom i

sposobnošću dao veliki doprinos radu i očuvanju pogona za vrijeme II. Svjetskog rata. U tom smislu se posebice može napomenuti da ne postoje nikakve indicije o njegovoj kolaboraciji sa NDH-vlastima. Dapače pojedini usmeni izvori ukazuju da je bilo određene suradnje s partizanima. Nažalost budući događaji će pokazati da nova vlast neće biti prema toj uglednoj obitelji ništa bolja od svih prethodnih vlasti.

## **5. Tragični događaji nakon drugoga svjetskoga rata**

Kako je već spomenuto, Gutmanova tvrtka u Belišću je uspjela poslovati i za vrijeme II. Svjetskog rata i to zaslugom inženjera Viktora Gutmana i njegovog sina Ernesta. Barun Viktor Gutman je rođen 1891 u Belišću i bio je zadnji voditelj tvrtke koji je bio inženjer strojarstva s diplomom današnjeg Tehničkog Univerziteta u Beču i ujedno je personificirao tragičan kraj obitelji Gutman u Belišću. Upravo je Viktor Gutman najzaslužniji što su industrijski pogoni sačuvani od razaranja i devastacije tijekom II. svjetskog rata.



Sl. 4. Barun Viktor Gutman [14]

Nakon što je tvrtka i njezini upravljači preživjela ratne probleme i poteškoće izazvane od strane vlasti NDH, nastao je možda i najteži trenutak za obitelj Gutman ali i za industriju u Belišću. Naime obitelj Gutman je preživjela probleme proistekle iz I. Svjetskog rata, monetarne i kulturološke probleme u poraću te se industrija modernizirala u vremenu između dva rata, da bi ih zadesila katastrofa nakon 1945 godine. Prije svega je to oduzimanje kompletne

imovine pod nazivom konfiskacija uz potpuno razvlašćivanje svih članova obitelji Gutman iz domene upravljanja tvrtkom. Osobno je barun Viktor Gutman od strane komunističkog režima 17. studenoga 1945. uhićen pod lažnim optužbama za suradnju s okupatorom. Nakon lažne optužbe i vrlo brzog suđenja Viktor Gutman je 1946. likvidiran u Zagrebu. Iza Baruna Viktora Gutmana i njegovih sinova te ostalih suradnika ostali su izuzetni industrijski pogoni kao i uskotračna željeznica. To je omogućilo kasniji uspješni razvoj industrije kasnije poznate kao „Kombinat Belišće“ koja je uspješno poslovala do 1990. da bi nakon pretvorbe vlasništva nastalo nekoliko uspješnih manjih poduzeća koja na bazi stranih ulaganja uspješno posluju u danas.[11]

Ovom prilikom treba svakako spomenuti epilog odnosno kakvu takvu rehabilitaciju ne samo Viktora Gutmana nego i cijele obitelji. Viktor Gutman je imao kćer Nelly koja je od 1950. godine živjela u Vancouveru u Kanadi. Na njezinu inicijativu je pokrenut postupak rehabilitacije Viktora Gutmana a time i obitelji. Na Županijskom sudu u Zagrebu je 2016. godine izvršena [revizija presude](#) i ukinuta presudu iz 1946. godine. [10]

## 6. Poseban osvrt na Gutmanovu željeznicu

U prvom razdoblju poduzeća [izgrađena](#) je željeznička pruga, širine tračnica jedan metar, koja je služila za prijevoz sirovine od šume Gradina do pilane te kroz pilanu. Izgradnja pruge će dalje ovisiti o količini eksploatacije šume. Glavna posebnost Gutmanove pruge je upravo širina kolosijeka. Naime, širina uobičajenih pruga iznosila je od 76 cm za uskotračne pruge do 143,5 cm za normalne pružne kolosijeke. Širina Gutmanove pruge od 100 cm proizlazi iz praktičnosti i štedljivosti. U vrijeme kada je Viktor Gutmann tražio dozvolu za izgradnju željezničke mreže za poslove poduzeća, jedna prigradska Bečka željeznica koja je imala promjer upravo 100 cm nalazila se u likvidaciji, tako da su Gutmani za veoma male novce kupili prugu, razmontirali je i podigli u području okoline Valpova i Belišća. Usput su bile kupljene i četiri lokomotive. Za razliku od pruga [promjera](#) 76 cm, ove su bile stabilnije. Problem će nastati u nužnom pretovaru robe pri uključivanju na pruge normalnog kolosijeka, iz čega je nastala i nepraktičnost ovih željeznica, a i kasnija nerentabilnost.[5]

Struktura i uloženi kapital u dioničko društvo [SPŽ](#) pokazuje novčanu snagu obitelji Gutman. Razlog zašto su Gutmani svoje željezničko poduzeće pretvorili u dioničarsko društvo proizlazio je iz zakona po

kojem su privatne civilne željeznice mogle biti isključivo u rukama dioničarskih društava. Sjedište društva je bilo u Budimpešti, gdje je društvo i registrirano kod trgovačkog suda 1. travnja 1889. godine. Velika većina dionica nalazila se u rukama belišćanskog poduzeća i to oko 58.865 komada, a oko 10.000 komada posjedovala su braća Gutman.

| Relacije                       | datum otvaranja pruge | dužina |
|--------------------------------|-----------------------|--------|
| Belišće - Viljevo Kapelna      | 12. 07. 1890.         | 32 km  |
| Viljevo Kapelna – Noskovci     | 02. 12. 1896.         | 21 km  |
| Donji Miholjac - Dravska obala | 02. 12. 1896.         | 4 km   |
| Belišće – Prandaunovci         | 27.07. 1899.          | 22 km  |
| Belišće - Dravska obala        | 27. 07. 1899.         | 1 km   |
| Moslavina Crnac – Voćin        | 02. 01. 1907.         | 52 km  |
| Voćin - Rupnica                | 02. 01. 1907.         | 6 km   |
| Mislavac - Slavonska Orahovica | 02. 01. 1907.         | 7 km   |
| Humljani - Slatinski Drenovac  | 02. 01. 1907.         | 8 km   |
| Belišće - Osijek               | 29. 11. 1908.         | 29 km  |
| ukupno                         |                       | 182 km |

Tablica 2. Željeznička mreža Gutmanove pruge od 1890-1908. godine [1]

SPŽ je također služila kao civilno prometno sredstvo, pa je dugo vremena služila u povezivanju krajeva od Voćina, preko Zdenaca kraj Orahovice, te područja Valpovštine s gradom Osijekom. Na režim na pruži građani su se često žalili, posebice na redovita kašnjenja u polasku i dolasku, te na strahovite gužve jer su željezničari prodavali više karata nego je bilo mjesta u vagonima. Gutmanova željeznica je služila za prijevoz robe i putnika sve do sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća kada je konačno ukinuta zbog nerentabilnosti.

## 7. Industrija Belišća nakon II. Svjetskog rata ( 1946-1990)

Krajem rata sva imovina je ponovo konfiscirana i prešla u vlasništvo nove države. Nakon konfiskacije 1946. poduzeće u Belišću preimenovano je u *Šumsko industrijsko poduzeće Belišće* (ŠIP Belišće). Preradba drva bila je osnova razvoja ali, zbog potreba održavanja postrojenja, razvijale su se i metaloprerađivačke i strojarske djelatnosti. Djelatnost poduzeća uključivala je proizvodnju tanina, suhu destilaciju drva, impregnaciju željezničkih pragova, proizvodnju bačava, pilanu, eksploataciju šuma, proizvodnju opeke i crijepa,



izradbu i popravke željezničkih vagona, riječnih objekata i strojeva, a uvelike je sudjelovalo u poslijeratnoj obnovi i izgradnji. Godine 1950. ime mu je promijenjeno u *Drveno industrijsko poduzeće Belišće* (DIP Belišće). Sagrađena je nova pilana (1954), iz remontne radionice izrasla je tvornica strojeva. Godine 1958. poduzeće je preimenovano u *Belišće – Kombinat za kemijsku i mehaničku preradu drva i proizvodnju strojeva* (Kombinat Belišće). Kombinat je postupno ukidao proizvodnju drvene vune, bačava, parketa, tanina, a modernizirao i razvijao ostale pogone.



Sl. 5. Pilana, druga polovica XX. st. [12]

Puštanjem u pogon nove tvornice (1960.), temeljna djelatnost poduzeća postala je proizvodnja polu celuloze, ambalažnoga papira i kartonske ambalaže, dok je tvornica tanina prestala s radom (1969.). Od 1972. poduzeće je poslovalo kao radna organizacija od osam OOUR-a: Belišće-Bel, Mehanička i finalna prerada drva, Tvornica strojeva, Sektor pomoćnih djelatnosti, Tvornica suhe destilacije drva, OOUR za građevnu, stambenu i komunalnu djelatnost, Komercijalni sektor i Restoran društvene prehrane, a od 1978. kao *SOUR Kombinat Belišće* (RO Belišće-Bel, RO Belišće-Metind, RO Belišće-Promet, zajedničke službe SOUR-a, te OOUR-i Tvornica strojeva i Održavanje). Proizvodni program uključivao je i strojeve za injekcijsko prešanje plastomera, hidraulične preše za gumarsku i drvnu industriju, strojeve, opremu i rezervne

dijelove za papirnu industriju, rezanu građu, drvene palete, drvni ugljen, i brikete te octenu kiselinu za prehrambene svrhe, a bilo je zaposleno oko 5000 radnika. Sredinom 1980-ih Kombinat Belišće bio je jedan od najvećih složenih kombinata u industriji za preradbu drva i imao je najveće kapacitete za proizvodnju polu celuloznih vlakana u SFRJ te među većim kapacitetima u Europi (1984. proizveo je 99 300 t polu celuloze i 165 000 t ambalažnoga papira kojega su se znatne količine izvozile). Od 1989. poduzeće je poslovalo pod imenom *Društveno poduzeće Kombinat Belišće*. [12]

## **8. Industrijski razvoj Belišća nakon pretvorbe i privatizacije vlasništva**

Nakon stjecanja samostalnosti RH, u izmijenjenim društveno-gospodarskim okolnostima poduzeće je 1992. bilo organizirano kao dioničko društvo s osam sastavnica (Tvornica papira i ambalaže Belišće-Bel, Tvornica strojeva, Tvornica primarne i finalne prerade drva, Tvornica suhe destilacije drva i dr.). Godine 1996. imalo je 2995 zaposlenih i proizvodilo je polu celulozu, ambalažni papir, transportnu i komercijalnu ambalažu od valovitoga kartona, spiralne cijevi i ambalažu te strojeve za brizganje plastičnih masa, traktorske prikolice, rezanu građu, drvni ugljen i dr.

Početkom 2000-tih broj zaposlenih se postupno smanjivao (oko 1200), a dionice poduzeća počelo je kupovati austrijsko poduzeće Duropack, koje je 2012. preuzelo Belišće d. d. Od 2012. poduzeće je pod nazivom *Duropack Belišće d. o. o.* poslovalo do 2015., kada ga je preuzela britanska kompanija za proizvodnju ambalaže DS Smith te je promijenilo ime u *DS Smith Belišće d. o. o.* Godine 2017. poduzeće, koje je zapošljavalo 404 radnika, proizvelo je oko 213 000 t papira (80% za izvoz) i oko 65 milijuna četvornih metara ambalaže od valovitoga kartona. Godine 2013. pogone suhe destilacije drva preuzelo je poduzeće *Fochista Belišće* u talijanskom vlasništvu, koje je 2020. zapošljavalo 95 radnika. [12]

Nastavak razvoja industrije u Belišću je poprimio drugačiji oblik sukladno modernim svjetskim kretanjima. To se osobito odnosi na malo poduzetništvo formirano u poslovnim zonama. Primjerice „Gospodarska zona Belišće“ (uz rijeku Karašicu), „Tržni centar Belišće“ i „Gospodarska zona Belišće sjever“ rade tvrtke kao što su: DS Smith Belišće Croatia d.o.o., Harburg-Freudenberger Belišće d.o.o., TEO-Belišće d.o.o., Leistriz turbinske komponente Belišće d.o.o., Fochista d.o.o., i dr. [13]

## **Zaključak**

Iz prethodnog sadržaja može se donijeti više zaključaka. Prije svega je to notorna činjenica da iza svake uspješne aktivnosti a u ovom slučaju je to industrija u Belišću, stoji uspješan pojedinac. U ovom slučaju se radi o Salamonu Heinrichu Gutmanu i njegovim nasljednicima. Posebno se mogu napomenuti i raznovrsne poteškoće s kojima se ta obitelj sukobljavala tijekom stotinjak godina. To se odnosi na promjene država i njihovih uređenja pa sve do životne ugroze za pojedince. Konačan rezultat je stvaranje uvjeta da je na razvojnim tekovinama obitelji Gutman nakon drugoga svjetskog rata nastalo i godinama poslovaio jedan respektabilni industrijski sustav pod poznatim nazivom „Kombinat Belišće“. Na tim temeljima i danas egzistiraju moderni industrijski pogoni oplemenjeni novo formiranim nizom malih gospodarskih subjekata. Većina novih poduzeća su nastala u kombinaciji stranih ulaganja i postojećih kadrova kao i tržišta. Upravo zahvaljujući razvoju nove industrije nakon pretvorbe vlasništva i privatizacije i samo mjesto Belišće postalo je grad sa svim potrebnim infrastrukturnim službama i ugodno mjesto za život. Ovaj tekst pokazuje kako jedan poduzetan pojedinac s svojom obitelji može biti inspirator i nositelj razvoja ne samo jednog mjesta nego i šire regije. Osim toga rezultati toga razvoja su bili poticaj za razvoj i industrijalizaciju bez obzira na različite poteškoće koje su donosile promjena društvenih i političkih režima.

## **Literatura**

[1] Hakenberg,J., Povijesni osvrt na bivšu Slavonsko-podravsku željeznicu (SPŽ), Zbornik Kombinata Belišće, Osijek 1980.

[2] Lazić,N., „ S:H: Gutman dd Belišće“, Zbornik radova sa simpozija „, Kombinat Belišće“ kao činilac privrednog razvoja, Belišće 08-09.07. 1978, str. 435-446.

[3] Vinaver,V., Ekonomska kriza i kursevi industrijskih akcija u Jugoslaviji ( 1929-1932), ACTA HISTORICO ECONOMICA JUGOSLAVIJE, VOL. 12, ZAGREB,1985, str.176-186.

[4] Volner, H., Poduzeće „, S.H.Gutman d.d.“ u vrijeme velike gospodarske krize (1929-1934), Scrinia slavonica, broj 7. 2007, str.328-341.).

[5] Volner, H., Drvna industrija Slavonije s posebnim osvrtom na obitelj Gutmann do kraja 1918. godine. Učiteljski fakultet, HISTORIJSKI ZBORNİK GOD. LXV (2012.), br. 2, str. 453–476.

- [6] <https://tehnika.lzmk.hr/gutmann-obitelj/>,( preuzeto 03.01.2023.)
- [7] <https://www.valpovstina.info/index.php/dogodilo-se/12762-roden-s-h-gutmann-rodonacelnik-drvopreradivackog-carstva-belisca-valpovstine-i-slavonske-podravine-> (preuzeto 04.01.2023.).
- [8] <https://www.belisce.hr/gospodarstvo-i-razvoj/>- ( preuzeto 04.01.2023.).
- [9] <https://www.tehnika.lzmk.hr/belisce-belisce/> ( preuzeto06.01.2023.).
- [10] <https://www.vecernji.hr/vijesti/tragedija-bogate-zidovske-obitelji-gutmann>
- [11] <https://www.> Tragedija obitelji Gutman iz Belišća (preuzeto 10.01.2023.).
- [12] <http://www.> Belišće d. d. | Hrvatska tehnička enciklopedija (preuzeto 11.01.2023.).
- [13] <https://belisce.hr/wp-content/uploads.> Strategija-razvoja-grada ( preuzeto 15.01.2023.).
- [ 14 ] <https://www.bing.com> (preuzeto 20.01.2022).

**POVIJEST I FILOZOFIJA TEHNIKE**

ZAGREB, FER, 14. i 15. LIPNJA 2023.

*Mirko Butković, Branislav Orčić***TEHNIČKA MEHANIKA U JUGOTURBINI I NJENIM NASLJEDNICAMA OD 1949. DO 1992. PA SVE DO 2022.****Sažetak**

Pod tehničkom mehanikom se podrazumijeva primijenjena statika, čvrstoća, kinematika i dinamika kao i njihove kombinacije. Prikazan je rad na konstrukciji i ispitivanju, prvo na parnim turbinama i pumpama, a nešto kasnije, na diesel motorima, a još kasnije na plinskim turbinama i na strojevima za mehaničko balansiranje strojeva. Opisani su proračuni čvrstoće, vibracija i vijeka trajanja dijelova i cjeline turbostrojeva i dizel motora, koristeći se klasičnim oblikom kao i kompjuterskim načinom proračuna. Prikazani su načini mjerenja sa od mehaničkih instrumenata, preko elektronskih i kompjutersko upravljanih. Navedeni su svi glavni stručnjaci koji su sudjelovali u radu na proračunima i mjeranjima mehaničkih veličina i čvrstoće. Naveden je rad na edukaciji kadrova Jugoturbine (iz tehničke mehanike), kroz Višu tehničku strojarsku školu, a kasnije kroz Veleučilište u Karlovcu.

**Ključne riječi**

mekanika, vibracije, balansiranje, naprezanja, strojevi

**Uvod**

Jugoturbina je osnovana 1949. za proizvodnju parnih turbina za pogon brodova što je uključivalo centrifugalne i zupčaste pumpe. Godine 1954. preseljena je iz Bregane u Jugoturbinu tvornica brodskih motora. Tako su nastala tri glavna proizvoda i tri glavne proizvodnje, ne samo za brodove već i za stacionarnu primjenu. Kasnije su se razvile i druge proizvodnje kao plinske turbine, klizni ležajevi, ekološka oprema, elektronika i druge.

Opisani su radovi na proračunima i mjeranjima mehaničkih veličina. U početku su proračuni vršeni pomičnim računalom (šiberom), da bi se kasnije sve više kompjuteriziralo. I mjerenja su počela mjeranjima torzionih vibracija mehaničkim uređajem, da bi se sve više koristili elektronički uređaji koji su nabavljani od poznatih svjetskih proizvođača, ali se radilo na razvoju vlastitih elektroničkih uređaja.

Tako je proizvodnja strojeva za balansiranje i uređaja za mjerenje i nadzor vibracija direktna posljedica rada na problemima tehničke mehanike.

Navedeni su i svi važniji stručnjaci koji su radili u tom području u Jugoturbini.

Prestankom rada Jugoturbine 1992., slijednice su nastavile raditi te mnoge rade i danas. Ukratko je opisan rad na tehničkoj mehanici do danas, ali i u obrazovanju tj na Višoj tehničkoj strojarskoj školi Karlovac (bila je članica Jugoturbine), kao i na slijedniku Veleučilištu u Karlovcu.

**1. Standardni provjereni konzervativni proračuni**

U Jugoturbini su se u procesu konstruiranja parnih turbina i pumpi, neophodno primjenjivala područja iz tehničke mehanike.

To su bili standardni, konzervativni i provjereni postupci provjere čvrstoće u području elastičnosti materijala, pri hladnim, toplim i vrućim uvjetima rada.

**1.1. U parnim turbinama**

- kućišta turbina VT, ST i NT,
- kućišta regulacijskih i stop ventila
- turbinskih rotora s provjerama cikličkih naprezanja na mjestima koncentracije naprezanja
- provjere kritičnih brzina vrtnje (grafičke metode)
- analitički i grafički izračuni vlastitih frekvencija lopatica (lopatica s konstantnim presjekom po

- visini)
- cjevovodi pare
- kućišta reduktora i zupčasti parovi
- spojke,
- itd.

Na tim su proračunima bili vodeći stručnjaci kao: Ernest Kraft od 1949.; Veljko Slapničar od 1949.; Marko Majcen od 1952.; Zvonko Elčić od 1957.; Stjepan Šaban, od 1964.; Stefan Todorovski od 1964., Vilim Prandl od 1953., Milorad Musulin, Bruno Rogić, Milivoj Krejči, Marijan Štulac, Branko Rački i drugi, svi ostali zaposleni poslije 1970.

Elektronski uređaj za mjerenje vibracija ležajeva turbine nabavljen je 1955. od firme Philips, a mjerenje je vršio Marko Majcen.

## 1.2. U pumpama

- kućišta pumpi
- provjere kritičnih brzina vrtnje (grafičke metode)
- čvrstoće lopatica i zakretnog mehanizma
- itd..

Na tim su proračunima bili vodeći stručnjaci kao:

Boris Kotljarov od 1949.; Eduard Smolej od 1951.; Mihaelo Žrvnar od 1953.; Blagoje Načevski od 1964.; Ivan Škrtić od 1967.; Ivan Mikšić od 1967.; Andrija Kavicki od 1969.; Ivan Stojković poslije 1970.

## 1.3. U Diesel motorima

Tvornica je imala licencu za motore švicarske firme Sulzer od 1955. Konstrukcija i provjera čvrstoće se provodila na slijedećim komponentama

- temeljnim pločama,
- spoju osovine motora s osovinam generatora, na osnovi izračuna vlastitih torzijskih frekvencija i prisilnih vibracija s naprezanjima (Holzerova metoda).

Proračune torzionih vibracija je provodio licencionar a podatke su pripremali Zlatko Jeličić i vanjski savjetnik Anton Vučetić. Mjerenje torzionih vibracija je provodio Brodarski institut s mehaničkim instrumentom "Geiger". Mjerači i analitičari su bili Boris Medja i Anton Vučetić.

Dolaskom Mirka Butkovića 1961. proračuni su vršeni u Jugoturbini sa savjetima Antona Vučetića i kontrolom Sulzera, ali nakon dvije godine proračuni su se osamostalili, a nabavljen je i mehanički instrument za mjerenje torzionih vibracija. Mjerenje i analize su vršili Jeličić i Butković. Proračunom su se određivale dimenzije zamašnjaka, zamašne ploče i protuutega na motoru i dimenzije generatorske osovine. S proizvođačem generator Rade Končarom iz Zagreba se surađivalo s Vladimirom Jarićem i Božidarom Frančićem. Proračuni su bili naporni jer su se vršili prvo velikim pomičnim računalom (šiberom), i TRS-ovim mehaničkim računalom. 1961. nabavljen je električni računski stroj, ali je to bilo malo unapređenje.

Jugoturbina je imala čehoslovačko elektroničko računalo Aritma s jednom memorijom i bušenim karticama. Butković je uspio 1963. izvršiti prve proračune vlastitih torzionih vibracija što je isto bilo sporo.

1964. prešlo se na računanje na Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, koji je imao IBM-ovo računalo. Proračun vlastitih i prisilnih vibracija motora na elastičnim temeljima započeo je Mirko Butković 1963. klasičnim metodama proračuna.

Pojavom računala i daljim razvojem elektronike, stvarani su potrebni programi i metode mjerenja za brže provođenje dotle vrlo teško izvedivih proračuna, mjerenja i analize. Jugoturbina je 1966. nabavila računalo UNIVAC, te su se od tada svi proračuni vršili u tvornici. Nabavljena je i elektronička oprema za mjerenje i analizu vibracija, te naprezanja. Osnovan je odjel za Istraživanje i razvoj gdje su se vršili proračuni i mjerenja za cijelu Jugoturbinu. U odjelu je započet i razvoj vlastite mjerne elektronike i strojeva za balansiranje

U nastavku su navedeni neki od osnovnih programa i analiza mehaničkih veličina.

## 2. Proračuni i mjerenja mehaničkih veličina

### 2.1. Torzijske vibracije

#### Programi

Program izračuna vlastitih torzijskih vibracija i naprezanja uz uvažavanje propisa registarskih društava.

Autori: Mirko Butković, Zlatko Jeličić

Prisilne torzijske vibracije s programom optimiranja torzijskih prigušivača i uz uvažavanje propisa registarskih društava.

Autori: Boško Dabelić, Ivan Škrtić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe poslije 1970. Program je prodan Jugoslavenskom registru brodova, koji im je služio za kontrolu proračuna drugih proizvođača motora.

#### Mjerenje i analiza torzijskih vibracija i naprezanja

Strojari: Mirko Butković, Ivan Škrtić, Zlatko Jeličić, Krešimir Paladin (poslije 1970.)

Elektroničari: Branko Čiška od 1969.; Antun Grgurić, Ivan Cvitanović od 1964.; Ante Renjić od 1964. i drugi poslije 1970.



Sl. 1. Mjerenje torzionih vibracija na ispitnoj stanici motora 1973. Od lijeva: Vladimir Godek, Zlatko Jeličić i Mirko Butković

### 2.2. Lateralne vibracije krutog tijela na elastičnim osloncima

#### Programi

Vlastite frekvencije

Autori: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe (poslije 1970.)

Prisilne vibracije

Autori: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe

#### Mjerenja i analize:

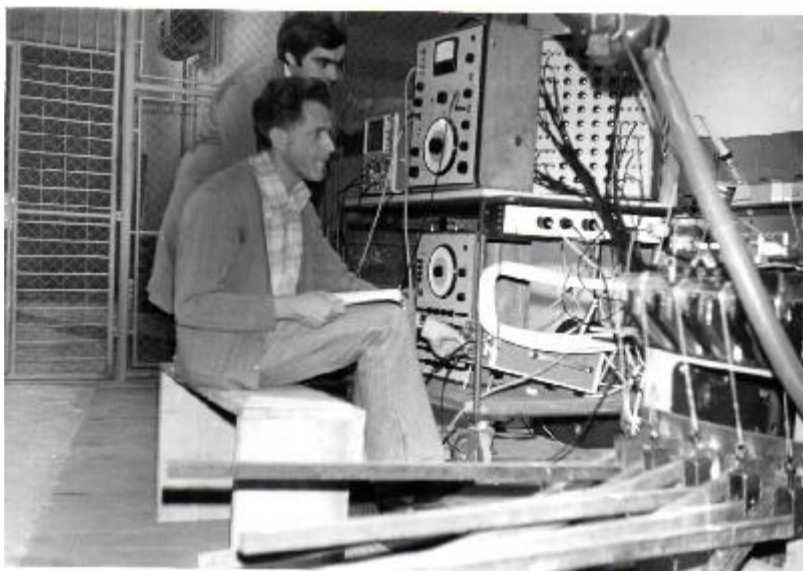
Strojari: Mirko Butković, Rudolf Zobec od 1964., Branislav Orčić, Ivan Škrtić, Jurica Štefančić, Zlatko Jeličić, Krešimir Paladin.

Elektroničari: Branko Čiška, Antun Grgurić, Miljenko Ožvald





Sl. 2. Ispitivanje tubinskih lopatica u laboratoriju 1968. Na slici Mirko Butković



Sl. 3. Ispitivanje prigušenja lopatica s prigušnom žicom u posebnom laboratoriju 1979. Na slici Anton Fudurić i Mirko Butković





Sl. 4. Ispitivanje lopatica FFT metodom u laboratoriju 1986.

## 2.3. Vibracije elastičnog tijela

### Programi

Vlastite frekvencije rotora s utjecajem krutosti ležaja i brtvi

Autori: Mirko Butković, Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe

Prisilne vibracije (eng. frequency response) rotora

Autori: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe

Vlastite frekvencije turbinskih lopatica s utjecajem bandaže ili prigušne žice

Autori: Mirko Butković, Branislav Orčić, Marina Tevčić

### Mjerenja i analize

Strojari: Branislav Orčić, Ivan Škrtić, Jurica Štefančić, Zlatko Jeličić, Krešimir Paladin, Antun Fudurić, Boris Žibrat

Elektroničari: Branko Čiška, Darko Vyroubal, Miljenko Ožvald, Antun Grgurić i drugi

## 2.4. Balansiranje rotacijskih tijela na gradilištu-pogonu

### Programi

Izračunavanje položaja i iznosa utega za balansiranje u više korekcijskih ravnina rotacijskog tijela.

Autori: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe

### Mjerenja i analize:

Strojari: Mirko Butković, Branislav Orčić, Ivan Škrtić, Jurica Štefančić, Zlatko Jeličić, Krešimir Paladin, Antun Fudurić, Boris Žibrat

Elektroničari: Branko Čiška, Miljenko Ožvald, i drugi

## 2.5. Izračuni čvrstoće

### Interni Programi Jugoturbine

Čvrstoća turbinske lopatice s utjecajem bandaže/prigušne žice

Autori: Branislav Orčić, Stjepan Šaban, Vojo Kecman, Milivoj Krejči i drugi

Čvrstoća turbinskog diska u monobloku ili navučenog na osovinu s određivanjem tolerancije navlačenja

Autori: Branislav Orčić

## 2.6. Mjerenja tenzometrima

- Kućišta parnih turbina i pumpi u hladnom stanju
- Mjerenje momenata u osovinama parnih i vodnih turbina, diesel motora, tijekom rada
- Mjerenje cikličkih naprezanja lopatica parnih i plinskih turbina
- Mjerenja naprezanja u raznim nosivim konstrukcijama ( dizalicama, kutijastim nosačima itd..)

Strojari: Ivan Škrtić, Jurica Štefančić, Zlatko Jeličić, Krešimir Paladin,  
Antun Fudurić, Boris Žibrat, Branislav Orčić,  
Elektroničari: Branko Čiška, Miljenko Ožvald, Antun Grgurić i drugi

## 2.7. Projektiranje i konstrukcija komponenata strojeva te strojeva za balansiranje i uređaja za nadzor vibracija.

Dobrim poznavanjem teorije vibracija je omogućilo stručnjacima ( strojarima i elektroničarima) JT razvoj u području konstruiranja i izrade komponenata strojeva i strojeva za balansiranje i uređaja za stalni nadzor vibracija ležaja turbine, pumpe i drugih strojeva.

**Prigušivači torzionih vibracija** (vodio Ivan Škrtić, računao Boško Dabelić, konstruirali Darko Šlat i Jadranko Jagodić). Izvedba s prigušnim oprugama i prigušnim uljem.

**Elastični elementi** (vodio Ivan Škrtić, konstruirao Jadranko Jagodić). Gumene elemente proizvodila gumara tvornice Josip Kraš Karlovac

**Zračna turbina** za ispitivanje modela aviona IL62 u zračnom tunelu (vodio Ivan Škrtić, konstrukcija i izračuni Čedomir Kralj, Jadranko Jagodić i Darko Šlat)

**Strojevi za balansiranje automobilskih kotača**

Ukupno je konstruirano i proizvedeno oko 12 tipova strojeva, ali je projekt za dalju proizvodnju unutar članica JT bio preskup i dalja je proizvodnja zaustavljena.

- Na poslovima konstruiranja i izrade elektronike su bili angažirani: Ivan Škrtić i Branko Čiška

### Horizontalni i specijalni vertikalni strojevi za balansiranje

#### - Vertikalni strojevi za balansiranje

Konstruirano je i proizvedeno oko dvadesetak vertikalnih specijalnih strojeva za balansiranje aksijalnih ventilatora, impelera pumpi, “felgi kamiona” za FAP i TAM.

#### - Horizontalni univerzalni strojevi za balansiranje rotora

Izrađeno je oko 45 horizontalnih univerzalnih strojeva za balansiranje rotora raznih vrsta i namjena, i mase rotora od 0.1 kg do 3000 kg.

Jedan od posljednje izrađenih je specijalni vrhunski stroj za balansiranje kotača vagona za HŽ. Stroj je osim elektronike za mjerenje položaja i iznosa debalansa imao prigradene glodaće glave za strojnu obradu kotača glodanjem. Sve je bilo automatizirano na bazi računala i CNC stroja.

U to vrijeme Schenck nije imao takav stroj,

Na poslovima konstruiranja su bili angažirani: Branislav Orčić (djelimično) , Ivan Škrtić ( djelomično), Josip Đurčević, Jadranko Jagodić, Vladimir Mađarac, Darko Šlat i drugi

Elektronike: Darko Vyroubal, Stanko Vađon, Igor Brlečić, Zdravko Vukelić, Ivan Kobasić, Dražen Žele, Antun Grgurić i drugi



Sl. 5. Razvoj horizontalnog stroja za balansiranje u laboratoriju 1986.



Sl. 6. Horizontalni stroj za balansiranjem tip SBH 3000 CNC, firme ENIN Karlovac (slijednica Instituta Jugoturbine) isporučen 1994. Gredelju Zagreb, za automatsko balansiranje vagonских osovina s kotačima

### **Uređaji za stalni nadzor vibracija ležaja turbina , pumpi, ventilatora i sličnih strojeva**

Uređaji su izrađivani u dvije varijante.

- Prva je bila na principu mjerenja vibracija akcelorometrima, koji su kupovani od proizvođača. Istih je Izrađeno i isporučeno za par turboagregata.

Druga je bila s beskontaktnim mjerenjima osovine na principu vrtložnih struja (eng. eddy current). Projekt je zaustavljen 1995.

Na poslovima konstruiranja i izrade elektronike za stalni nadzor vibracija su bili:

Darko Vyrubal, Miljenko Ožvald, Stanko Vađon, Ivan Kobasić, Dražen Žele i Antun Grgurić.

Navedene aktivnosti provedene su u Jugoturbini do 1992. i u energetske institutu ENIN, koji je nastao privatizacijom Instituta Jugoturbine. ENIN je prestao postojati 1996. kad su stručnjaci za mehaniku i elektroniku prešli u tvornicu turbina ABB, koja je od 1990 godine bila vlasnik bivše Tvornice turbina Jugoturbina. Stručnjaci nekadašnjeg instituta ENIN su u ABB (kasnije ALSTOM) radili na konstrukciji i proračunima čvrstoće i vibracija isključivo plinskih i parnih turbina iz programa ABB, ALSTOM i konstrukcijama iz programa Jugoturbine.

### **3. Komercijalni programi MKE korišteni u firmi ALSTOM Karlovac od 1996. do 2017**

Korišteni su programi: ANSYS, ABAQUS, ALGOR

#### **3.1. Izračuni čvrstoće komponenti parnih turbina s utjecajem tlaka, temperatura u radnom i tranzijentnom opterećenju :**

- VT, ST, NT kućišta,
- Stop ventila i ventilska kućišta
- Turbinski diskovi u monobloku i navučeni
- Turbinske lopatice

Računači: Berislav Kralj, Branislav Orčić, Nenad Lorković, Darko Perak, Marina Tevčić, Jasna Hoppe i Marija Kuka

#### **3.2. Izračuni preostalog vijeka trajanja komponenti parnih turbina**

Računači: Mirko Butković, Berislav Kralj, Ivan Škrtić, Branislav Orčić, Nenad Lorković, Darko Perak, Marina Tevčić, Jasna Hoppe i Marija Kuka. Za proračun naprezanja i deformacije korišten je program ALGOR i bilinearna metoda.

#### **3.3. Izračuni čvrstoće komponenti plinskih turbina u radnom i tranzijentnom opterećenju za servisni dio**

- Oplate komore izgaranja s utjecajem keramičke zaštite i utjecajima hlađenja,
- Redizajnirane kompresorske lopatice

Računači: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe i Ivan Lenuzzi

#### **3.4. Izračuni strujanja, prijelaza topline, čvrstoće (linearna i nelinearna analiza), vibracija i vijeka trajanja (LCF= niskociklički zamor: HCF=visokociklički zamor; oksidacija toplinskih izolatora) komponenti plinskih turbina u radnom i tranzijentnom opterećenju za razvojni servisni dio odjela plinskih turbina**

- Ispušni difuzori 1 i 2
- Usisni dio (Air Intake Manifold),
- Čvrstoća uslijed potresnih opterećenja:
  - turbobloka,

- pomoćnih blokova ( za dopremu ulja, zraka, itd..)

Računači: Branislav Orčić, Marina Tevčić, Jasna Hoppe i Ivan Lenuzzi

- Komore izgaranja za VT i NT dio plinske turbine
- Plamenici (breneri) s utjecajima hlađenja
- Čvrstoća turbinskog rotora
- kompresorske i turbinske lopatice
- kućišta
- toplinski štitovi
- sustavi za dovod goriva
- razvoj novih metoda proračuna, sudjelovanje u laboratorijskim ispitivanjima
- sustavi za dizanje i manipuliranje kućišta plinskih turbina

Računači: Alen Marković, Mario Domboš, Peđa Milanović, Mario Colnar, Denis Stanković, Darko Kavicki, Mladen Matan, Ivan Lenuzzi, Marija Špelić, Ana Pudrlja, Marko Škunca, Danijel Barjašić, Tomislav Kovačić, Nikola Vranić i drugi

### **3.5. Cjevovodi oko turbobloka i termoelektrane za parni dio i rashladnu vodu u kondenzatoru**

Program: Cezar, Rohr2

Računači: Ines Lemajić, Nenad Lorković, Darko Perak, Željko Škrtić, Alenka Crkvenac, Marija Kuka...

Kupnjom ALSTOM-a od strane General Electric-a 2018. prestala je inženjerska aktivnost na konstrukciji i mehaničkim proračunima plinskih turbina te je 200 inženjera dobilo otkaz.

Stotinjak je nastavilo rad u indijskoj firmi INFOSYS u Karlovcu, na istim poslovima razvoja plinskih turbina firme ALSTOM koju je djelomično kupio talijanski ANSALDO, ali i šire.

## **4. Proračuni čvrstoće i vibracija u INFOSYS Karlovac od 2017. do 2022.**

Korišteni su programi: ANSYS, ABAQUS, Simufact, Cezar, Rohr2...

Dio tima za proračun mehaničkog integriteta i strujanja nastavlja raditi na poslovima razvoja plinske turbine za General Electric a drugi dio sudjeluje u razvoju komponenti plinskih turbina i avio motora za Ansaldo, Solar Turbines San Diego, Siemens, Rolls Royce, Phoenix BioPower...

Izračuni strujanja, prijelaza topline, čvrstoće i vijeka trajanja komponenti plinskih turbina i avio motora u radnom i tranzijentnom opterećenju:

- Komore izgaranja za VT i NT dio plinske turbine
- Plamenici (breneri) s utjecajima hlađenja
- Sustavi za testiranje plinske turbine
- Čvrstoća turbinskog rotora
- Kompresorske i turbinske lopatice
- Kućišta
- Toplinski štitovi

- Sustavi za dovod goriva
- Sustavi za ispitivanje avionskih motora
- Pomoćni sustavi
- Cjevovodi oko turbobloka i termoelektrane za parni dio i rashladnu vodu u kondenzatoru

Računači: Ines Lemajić, Alenka Crkvenac, Mario Domboš, Alen Marković, Peđa Milanković, Denis Stanković, Ivan Turčinović, Ana Pudrlja, Mladen Matan, Renato Vidić, Željko Škrtić i drugi

## **5. Aktivnosti na mehanici u ostalim firmama u Karlovcu nastalih raspadom Jugoturbine od 1992. do 2022.**

Raspadom Jugoturbine 1992. nastalo je više firmi u Karlovcu koje su se bavile mehanikom. Osim već spomenutog instituta ENIN, nastale su slijedeće firme:

**5.1. Turboteh Karlovac.** Osnovan je 1992. a bavio se remontom turbina i pumpa. Imao je opremu za mjerenje vibracija i balansiranje ali mehaničke proračune nije radio. Godine 2007. kupio ga je ALSTOM Karlovac

**5.2. Dinamika d.o.o.** Karlovac. Firma se bavi mjerenjem i analizom vibracija i proizvodnjom i remontom strojeva za balansiranje, što obuhvaća i teoretsko znanje o balansiranju krutih i elastičnih rotora. Rade i proračune vlastitih frekvencija fleksijskih i torzijskih vibracija. Osnovana je 1992. i sada je aktivna. Stručnjaci za vibracije i balansiranje su Branko Čiška do 2019. (elektroničar), Anton Fudurić (strojar), Darko Fudurić (elektroničar)

### **5.3. Tvornica turbina Karlovac**

Bavi se konstrukcijom i proizvodnjom parnih turbina, pumpa i drugih strojeva i uređaja.. Osnovana 1992. i sada je aktivna.

---

U tvrtki se u procesima remonata i dizajna novih tipova primjenjuju standardni provjereni proračuni i analize čvrstoće komponenata i analize iz područja vibracija (Kritične brzine vrtnje rotora). U suradnji s Tehničkim fakultetom Rijeka provjerava se stabilnost uljnog filma kliznih ležajeva, za turbine s većom brzinom vrtnje od  $10000 \text{ min}^{-1}$ . Povremeno sudjeluju Sanjin Braut, Roberto Žigulić i Mirko Butković.

Metoda konačnih elemenata se primjenjuje za izračune čvrstoće u područjima elastičnog i elastoplastičnog područja materijala osobito kritičnih elemenata (turbinske lopatice, turbinske rotore i ventilska kućišta), u analizama vibracija sklopova (kao ležajni blokovi, cjevovodi oko turbine, itd).

Navedene aktivnosti vode : Milorad Musulin, Marijan Štulac, Branko Rački, Kristijan Špoljarić, Branislav Orčić (povremeno) i drugi.

### **5.4. Tvornica plinskih turbina Karlovac**

Tvornica je bila dio Jugoturbine, ali od 1992. nastavlja poslovati kao privatna firma u stranom vlasništvu. Proizvodi komponente plinskih turbina i zračnih kompresora za avionsku industriju i petrokemiju. Proizvodi lopatice od aluminijskih legura, legiranih čelika i niklovih legura. Povremeno se ispituje ciklička čvrstoća, te se kod toga provode proračuni, mjerenja i statističke analize. Sudjeluju, Mirko Butković, Sanjin Braut i Branislav Orčić

## 6. Nastava mehanike na Višoj tehničkoj strojarskoj školi Karlovac od 1960. Do 1997. te na Veleučilištu Karlovac od 1997. do 2022.

VTŠŠ je osnovan 1960. od strane poduzeća Jugoturbine, Korduna i Žeče-a. Jugoturbina je davala većinu financija i gotovo 100% nastavnika. Godine 1997. osnovano je Veleučilište sa stručnim studijima, a 2004. osnovan je specijalistički diplomski studij strojarstva. Tada su uvedeni predmeti: mehanički integritet strojeva, vibracije dinamika strojeva i konačni elementi.

Prvi nastavnik iz predmeta mehanike 1. 2. 3. (što je obuhvaćalo i čvrstoću) bio je **Josip Blažević** prof. više škole od 1960. do 1963. Kasnije je predavao nauk o toplini.

Naslijedio ga je **Mirko Butković** 1961. kao asistent a od 1963. kao predavač i profesor sve do 2006. kad odlazi u mirovinu. Predavao je i dinamiku strojeva, vibracije i dinamiku strojeva, te mehanički integritet strojeva.

**Branislav Orčić** bio je asistent pa sve do višeg predavača od 1971. do 2013. iz predmeta mehanika te metode konačnih elemenata.

**Ivan Škrtić** bio je asistent na predmetima mehanike od 1974. pa sve do profesora visoke škole na predmetima čvrstoća do 2012..

**Nenad Lorković** asistent iz predmeta mehanika 1 i 2 od 2002. a kao predavač iz mehanike 1 od 2015. do danas.

**Marko Jokić** radi na Veleučilištu u Karlovcu od 2004. do 2009. Kao znanstveni novak i asistent na predmetima mehanika 2, teorija vibracija, mehanički integritet strojeva i metoda konačnih elemenata.

Primljen je kao znanstveni novak na znanstveni projekt koji je vodio prof. Butković "Optimizacija parametara konstrukcija strojeva na produženje životnog vijeka" br: 248-0691736-1821, 2007-2010. Veleučilište u Karlovcu

**Josip Hoster** viši predavač iz predmeta čvrstoća 1 i 2 i mehanički integritet strojeva od 2012. do danas.

**Tihomir Mihalić** profesor visoke škole predaje kinematiku, dinamiku i metodu konačnih elemenata 1 i 2. od 2012. do danas

### Zaključak

Konstrukcija, proizvodnja i održavanje parnih i plinskih turbina, diesel motora i raznih vrsta pumpi zahtijevalo je veliko znanje inženjera u području termodinamike, dinamike fluida te mehanike krutih i čvrstih tijela.

Ovdje je prikazan dio rada na mehanici čvrstih tijela, koji je razgranat na statički i dinamički dio, gdje dinamika i vibracije igraju ključnu ulogu kod strojeva.

Nabrojani su mnogi stručnjaci koji su izrasli na radu u Jugoturbini, ali moramo navesti dvije ključne figure koje su zaslužne da su jugoturbinski stručnjaci brzo i temeljito savladali problematiku. To je prof. Ernest Kraft (AEG) koji je dao cijelu koncepciju prve parne turbine (i grafičkog proračuna kritičkih brzina), te prof. Anton Vučetić (FSB), koji je radio na početku proračuna i mjerenja torzionih vibracija diesel motora.

## TECHNICAL MECHANICS IN JUGOTURBINA AND ITS SUCCESSORS FROM 1949. TO 1992. UNTIL 2022.

### **Abstract**

Technical mechanics refers to applied statics, strength, kinematics and dynamics as well as their combinations.

Activity on construction and testing was presented, first on steam turbines and pumps, and a little later, on diesel engines, and even later on gas turbines and machines for mechanical balancing of machines. Calculations of strength, vibration and service life of parts and wholes of turbomachines and diesel engines are described, using the classical form as well as the computer method of calculation. Methods of measurement with mechanical, electronic and computer-controlled instruments are presented. All the main experts who participated in the work on calculations and measurements of mechanical quantities and strength are listed. The work on the education of Jugoturbine personnel (in technical mechanics) through the Higher Technical School of Mechanical Engineering, and later through the Polytechnic in Karlovac, was mentioned.

### **Keywords**

mechanics, vibrations, balancing, stresses, machines





*Darko Veljan<sup>1</sup>*

Prirodoslovno-matematički fakultet

Matematički odsjek, Zagreb

**PROF. DR. SC. ZVONKO BENČIĆ I DIPL. ING. DAMIR  
MIKULIČIĆ UREDNICI KNJIGE „VELIČANSTVENA  
MATEMATIKA“**



Zvonko Benčić



Damir Mikuličić

Prof.dr.sc. Zvonko Benčić rođen je u Senju 1940. godine. Pohađao je osnovnu školu i gimnaziju u Zagrebu (II muška gimnazija). Diplomirao je ETF (današnji FER) Sveučilišta u Zagrebu 1963. Magistrirao je na PMF- u Sveučilišta u Zagrebu 1969., a doktorirao na FER-u 1988. Profesor Benčić jedan je od utemeljitelja energetske elektronike u Hrvatskoj. NA FESB-u Sveučilišta u Splitu utemeljio je još davne 1974. godine predmet Energetska elektronika, gdje je ustanovio i opremio odgovarajući laboratorij. Od 1962. do 1994. radio je i na Elektrotehničkom institutu „Rade Končar“ u Zagrebu. Tada se zaposlio na FER-u, gdje je radio od

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće / instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća / institucije.

2000. do umirovljenja 2011. godine kao redoviti profesor u trajnom zvanju.

Sudjelovao je na mnogim znanstvenim skupovima i projektima na stvaranju potrebe energetske gospodarstva. Sudjelovao je u projektiranju na više od 800 prototipova uređaja energetske elektronike. Autor je više sveučilišnih skripti za studente te autor ili suautor više od 60 znanstvenih radova. Napisao je više od 50 eseja iz područja energetske elektronike.

Bio je urednik više od 100 knjiga iz raznih područja znanosti, tehnike i povijesti znanosti te tehnike. Dobio je više od deset nagrada; među ostalim „Josip Juraj Strossmayer“ HAZU, a 2010. godine godišnju nagradu „Nikola Tesla“ Hrvatske sekcije IEEE. Nakon odlaska u mirovinu bio je i dalje vrlo aktivan kao urednik znanstvenih skupova i zbornika radova „Povijest i filozofija tehnike“ sve do 2021. godine, kad je, nažalost, preminuo.

U okviru Odjela za prirodoslovlje i matematiku Matice hrvatske u Senju je održao 2018. godine predavanje o svojem ocu- profesoru matematike i fizike i o tome napisao članak (zajedno s Brankom Hanžekom) „Vladimir Benčić-školovanje i službovanje na Senjskoj gimnaziji“ u časopisu Prirodoslovlje 18 (1-2), 3-30 (2018).

Posljednju godinu svog plodonosnog stvaralaštva veliko je vrijeme posvetio uređivanju prijevoda knjige C. Pickover, The Math Book, Sterling, New York, 2009. Ta je knjiga u svoje vrijeme bila svjetski hit u području povijesti znanosti, te je 2011. godine dobila prestižnu nagradu Britanskog instituta za povijest znanosti kao najbolja u tome području. Knjigu je preveo na hrvatski, prilagodio i na više mjesta nadopunio s pojedinim objašnjenjima, nadopunio s novim podacima i datumima autor ovog članka, D. Veljan, s kraćim prilozima i o našim znanstvenicima, npr., Boškovićem, Teslom, Varićakom, Fellerom, Ružičkom, Blanušom, Mardešićem, Grünbaumom, Prelogom, Jankom, našim prvim piscima matematičkih udžbenika Mijom Šilobodom-Bolšićem i Matom Zoričićem iz 18. stoljeća i drugim. U prijevodu smo spomenuli i naša najstarija sveučilišta: zadarsko i zagrebačko. Spomenuli smo zašto nam je u matematičkoj povijesti važan i knez Branimir i Herman Dalmatin i fra Luca Pacioli - suradnik Leonarda da Vincija - koji je predavao matematiku i u Zadru oko 1500. godine. Spomenuli smo i prvo elektroničko računalo u Hrvatskoj iz 1967., koje je nabavljeno preko tadašnjeg Instituta za matematiku čiji je ravnatelj tada bio prof. Vladimir Vranić, te smješteno na Institutu Ruđer Bošković. Naveli smo i neke stare hrvatske nazive, primjerice hitnica za parabolu, pakružnica za elipsu, šiljnik za piramidu, bridnik za prizmu, brojidbu za statistiku, lihe i tahe brojeve za parne i neparne, četvorina za kvadrat itd. Osim, naravno, uobičajenih zbroj za sumu, umnožak za produkt, obujam za volumen itd.

Profesor Benčić je kao prvi urednik te knjige prevedene kao „Veličanstvena

matematika – kroz povijest u riječi i slici“ prihvatio moj spomen tih starih hrvatskih riječi u knjizi i bitno pridonio njenoj kvaliteti u činjeničnom, tehničkom, jezičnom i gramatičkom smislu. Smatrao je da je knjiga izuzetno kvalitetna i da on kao erudit nije za mnoge stvari navedene u knjizi a naročito u prijevodu nije znao. Kao urednik nije se protivio da dodam dva nova poglavlja u prijevodu: Milenijski (i još neki) problemi, te Abelova nagrada. U poglavlju o problemima su navedeni osim milenijskih problema čije svako rješenje Clayova fundacija nagrađuje s milijun američkih dolara, naveo sam po svojem izboru još 20- ak teških neriješenih starih i novijih matematičkih problema. U poglavlju Abelova nagrada naveo sam sve dosadašnje (od 2002. do 2022.) te godišnje prestižne nagrade čiji dobitnici dobivaju milijun dolara (ili oko 900000€) i smatra se pravom zamjenom za Nobelovu nagradu u drugim područjima.

Upravo nakon što je knjiga izašla objavljeno je ime Abelovca za 2023., a to je argentinsko-američki matematičar Louis Caffarelli, profesor na Sveučilištu Austin, Tx, SAD, za njegove važne radove o parcijalnim diferencijalnim jednadžbama. Njima se opisuju razni fizikalni procesi i složeni dinamički sustavi, primjerice u meteorologiji, turbulencijama u tekućinama i atmosferi, energetici i drugdje.

Profesor Benčić je uspio izboriti i manju potporu MZO RH za izdavanje knjige. Knjiga je trebala izaći tijekom 2022. godine ili najkasnije početkom 2023. u izdavačkoj kući „Kiklos“, Zagreb. Na žalost, prof. Benčić, preminuo je u rujnu 2021., u tijeku rada na toj knjizi. Knjiga je ipak izašla u travnju 2023. u izdanju izdavačke kuće „Izvori“, Zagreb, pod uredništvom dipl. ing. Damira Mikuličića i autora prijevoda.

Profesor Zvonko Benčić bio je, osim vrhunskog znanstvenika i praktičara iz područja energetske elektronike, koja je danas jedna od ključnih grana energetskih čimbenika, također i pisac i urednik brojnih projekata i znanstvenih skupova na teme energetike. Danas su te teme na vršnoj listi prioriteta svjetske ekonomije. A njegove bi zamisli mogle zasigurno pridonijeti svojim konstruktivizmom aktualnom rješavanju te krize. Njegove zamisli o efektivnoj uporabi elektronike u energetici mogle su biti vrlo bitne u nedavnim energetskim problemima, ali je, nažalost, preminuo. O tim primjenama i ostalim Benčićevim zamislima zasigurno će više reći i napisati drugi govornici i njegove kolege, studenti i stručnjaci iz elektronike i elektrotehnike.

Novi urednik „Veličanstvene matematike“, dipl. ing. Damir Mikuličić prihvatio je gotovo sve uratke prethodnog urednika Z. Benčića, prihvatio i moje napomene i dodatke, a dodao je i neke svoje. Oblikovao je naslovnicu i poledinu knjige te prvih nekoliko strana. Od izdavača Sterling iz New Yorka smo u međuvremenu otkupili i originalne fileove slika i autorska prava. I sam je Mikuličić diplomirani inženjer elektrotehnike, bivši novinar „Vjesnika“ o znanstvenim temama i

dugogodišnji urednik izdavačkog poduzeća „Izvori“ koje uglavnom izdaje znanstvene, znanstveno- popularne i knjige znanstvene fantastike. Još 2012. godine, i sam je sudjelovao u prijevodu knjige istog autora C. Pickovera „Strast za matematikom“, Izvori, Zagreb, 2012.

Ovim se putem želim zahvaliti i gđi. Marini Tolj, dipl. iur., kćerki prof. Benčića.

*Darko Veljan*

Naslovnica knjige: Veličanstvena matematika

