

Simpozij »Nikola Tesla«

ZAGREB — SMILJAN/GOSPIĆ
7— 10. jula 1976.

II KNJIGA



JUGOSLAVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI

JUGOSLAVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI

SIMPOZIJ »NIKOLA TESLA«

u okviru programa proslave
120. obljetnice rođenja Nikole Tesle

Zagreb - Smiljan/Gospić, 7-10. jula 1976.

ZAGREB, 1978.

REDAKCIJSKI ODBOR ZBORNIKA RADOVA

dr Tomo Bosanac Branko Jemrić, dipl.ing.
dr Božidar Frančić dr Sead Krajinić
dr Mirjan Gruden dr Vladimir Matković
dr Zijad Haznadar dr Petar Miljanić
 dr Vladimir Muljević
 dr Gojko Muždeka
 dr Ranko Wolf

Urednik:

dr Tomo Bosanac

Tisak: Sveučilišna naklada Liber

ODBOR SIMPOZIJA "NIKOLA TESLA"

Predsjednik

dr TOMO BOSANAC, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; izvanredni član Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti

Članovi:

dr BOŽIDAR FRANČIĆ, direktor Elektrotehničkog instituta "Rade Končar", Zagreb

dr MIRJAN GRUDEN, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerze u Ljubljani

BRANISLAV JANKOVIĆ, dipl.ing, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Sarajevu; savjetnik u Istraživačko-razvojnom centru za energetiku "Energoinvest", Sarajevo

BRANKO JEMRIĆ, dipl. ing, rukovodilac Tehničke službe Tvornice električnih žarulja "TEŽ"; izvanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

dr STANIMIR JOVANOVSKE, redovni profesor Elektrotehničkog i mašinskog fakulteta Univerziteta u Skopju

dr VLADIMIR KNAPP, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

VOJNO KUNDIĆ, dipl. ing, glavni direktor Instituta "Rudjer Bošković", Zagreb

dr VLADIMIR MATKOVIĆ, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; izvanredni član Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti

dr PETAR MILJANIĆ, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu; dopisni član Srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd

dr GOJKO MUŽDEKA, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

dr VOJIN POPOVIĆ, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

dr IVO ŠIMONOVIĆ, predstojnik Zavoda za radiologiju Kliničkog bolničkog centra, Zagreb; redovni profesor Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Referati su objavljeni u rukopisu i predstavljaju
stavove autora

SADRŽAJ

	Stranica
VI. poglavlje RASKLOPNA TEHNIKA	7
Z.Gajić, P.Bojić: Sumporni heksafluorid kao sredstvo za električnu izolaciju i gašenje električnog luka u sklopnim aparatima visokog napona	9
I.Kamenica, M.Abadžić: Matematski model dinamičkog električnog luka i analiza realnosti pretpostavki koje ga definišu	31
N. Kopčić: Određivanje osnovnih karakteristika elektromagneta računskim i eksperimentalnim putem pri razvoju sklopnika	53
S. Krajinić: Stanje i tendencije razvoja sklopnih aparata	67
I. Naumovski: Nestabilnost dinamičkog luka pri isklapanju malih induktivnih struja	99
G. Catenacci: Role of High Power Laboratories in Switchgear development	113
A. Erk: The Electric Contact in Power Switching Devices	121
W. Rieder: Actual Circuit-Breaker Arc Research	135
VII. poglavlje PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE	151
A. Ašner: Prijenos električne energije pomoću supravodljivih kabela	152
I. Ivanković: Izolacija suvremenih transformatora najviših napona	175
P. Jovanović: O mogućnostima svjetskog sistema za proizvodnju i prenos električne energije	186
G. Muždeka: Prenos električne energije - jučer, danas, sutra.	195
N.Ž. Petković, R.Naumov: Prenaponi pri komutacijama kratkih deonica sabirnica 380 kV	211
M. Stojasavljević: Utjecaj regulacije uzbude sinhronih generatora na paralelni rad elektroenergetskih sistema	323
Z. Valković: Istraživanje elektromagnetskih polja u transformatorima	239
P. Vešić: Mjerni transformatori za 400 kV mrežu SFRJ	247
Ch. Concordia: Development of Electric Power Transmission Networks	255
M.V. Frank: From Adams Station to USA's Integrated Utility System	269

VIII. poglavlje KONVERZIJA ENERGIJE	285
J. Andrić: Električne mikro centrale	287
A. Grapci: Perspektiva olovniha akumulatora kao izvora energije	298
V. Knapp: Novi izvori energije; geotermalna energija suhih stijena	307
B. Milosavljević: Konverzija eolske energije u električnu pri- menom asinhronih generatora	321
H. Požar: Opskrba električnom energijom u budućnosti	333
M. Savić, R. Kovačić, N. Rajković: Teslin transformator i jed- na mogućnost njegove primene	359
D. Smiljanić, S. Novosel: Oprema za nuklearna istraživanja ..	371
T. Šurina: Teslin "ventilni vod" i fluidika	383
J. Kortán, L. Kučera: Radiative Energy Conversion in Electron Beam Systems	393
IX. poglavlje RASVJETA	403
B. Jemrić: Metalno halogenske žarulje kao perspektivni izvor danje svjetlosti	405
F. Kritovac: Rasvjeta kao kriterij kvalitete ljudske okoline ...	417
J.R. Morin: Light Sources - Past, Present, and Future	429
X. poglavlje VISOKOFREKVENTNA TEHNIKA	441
B. Kviz: Optički valovodi u laserskim komunikacijama	443
B. Modlic: Prijenos i obrada signala nesinusnim funkcijama u suvremenim radiokomunikacijama	457
G. Stojkovski: Primjena poluvodičkih lasera kod velikih brzina prijenosa informacija	467
E. Zentner: Mogućnosti djelotvornijeg iskorištenja radiofrek- vencijskog spektra u mobilnim radiokomunika- cijama	479
L. Vodovnik, A. Kralj: Tesla in jugoslovanska medicinska elektronika	493
XI. poglavlje TELEKOMUNIKACIJE	503
Z. Smrkić: Suvremeni problemi komunikacija	505
S. Svirčević: Udio tvornice telekomunikacionih uređaja "Nikola Tesla" u razvoju telekomunikacija u SFRJ	515
Z. Vuković, M. Jozić, A. Glišić: Telekomunikacioni sistem za prijenos podataka malim brzinama	523
B. Zovko-Cihlar: Primjena nove tehnologije u frekventno ovis- nim sklopovima radiorelejniha sustava	533

VI. Poglavlje

RASKLOPNA TEHNIKA



Zoran Gajić i Predrag Bojić
"Energoinvest" - Istraživačko
razvojni centar za elektro-
energetiku, Sarajevo

SUMPORNI HEKSAFLUORID KAO SREDSTVO ZA ELEKTRIČNU IZOLACIJU I GAŠENJE ELEKTRIČNOG LUKA U SKLOPNIM APARATIMA VISOKOG NAPONA

Razmatrane su osobine SF_6 bitne za razumijevanje odličnih dielektričnih osobina ovog gasa. Dati su elementarna teorija mehanizma dielektričnog proboja u SF_6 i neki aspekti proračuna električne izolacije. Prodiskutovani su mala vrijednost vremenske konstante opadanja električne provodnosti luka u SF_6 u oblasti nule struje i neke specifičnosti SF_6 prekidača u pogledu gašenja luka.

SULFUR HEXAFLUORIDE AS AN ELECTRICAL INSULATION AND ELECTRIC ARC QUENCHING MEDIUM IN HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS

The various features of SF_6 important for understanding the excellent dielectric properties of this gas are considered. An elementary theory of the dielectric breakdown mechanism in SF_6 , and some aspects of electrical insulation design are presented. The low value of electrical conductance decay time constant of SF_6 arc in the current zero region, and special properties of SF_6 circuit breakers in terms of arc quenching are discussed.

1 UVOD

U posljednje dvije decenije, nakon pola vijeka skoro isključive upotrebe vazduha i ulja kao sredstava za električnu izolaciju i gašenje električnog luka u rasklopnoj tehnici visokog napona, došlo je do veoma brzog porasta praktične primjene trećeg medija za ovu svrhu - gasa sumpornog heksafluorida (SF_6).

Još krajem prošlog vijeka došlo se do spoznaje da neki gasovi i pare, mediji kojima se nalaze elementi iz VI i VII grupe periodskog sistema Mendeljeva imaju veću dielektričnu čvrstoću od vazduha. Kompleksna ispitivanja vršena tokom poslednjih decenija pokazala su da od svih posmatranih gasova SF_6 , koga su 1897 g. prvi put dobili fizičari Moisan i Lebeau, najuspješnije zadovoljava složene zahtjeve primjene u aparatima visokog napona.

Pored veoma dobrih osobina u pogledu električnog izolovanja i gašenja električnog luka, o čemu će se više govoriti u daljem tekstu, SF_6 posjeduje slijedeće kvalitete: nezapaljivost, neotrovnost, veliku hemijsku postojanost, visoku toplotnu provodnost.

Pored sve veće primjene u prekidačima i metalom oklopljenim postrojenjima visokog napona, SF_6 se uspješno koristi u strujnim mjernim transformatorima vanjske montaže, cijevnim vodovima i dr.

2 ELEKTROIZOLACIONA SVOJSTVA GASA SF_6

Električna čvrstoća gasovite izolacije u homogenom i malo nehomogenom (kvazihomogenom) polju raste proporcionalno sa porastom pritiska i kod određenih uslova čvrstoća gasovite izolacije može biti veća od čvrstoće transformatorskog ulja, porcelana i visokog vakuuma.

Medjutim, uslovi u kojima se izvode eksperimenti nisu često adekvatni onima u eksploataciji pa je često vrlo teško izvršiti kvantitativnu procjenu pojedinih faktora koji utiču na električnu čvrstoću izolacije.

Kod najprostijeg slučaja n.pr. u homogenom polju, električnu čvrstoću rastojanja izmedju dvije elektrode određuju: vrsta gasa, pritisak, rastojanje izmedju elektroda, oblik ispitnog napona i njegovo trajanje, uslovi ionizacije rastojanja izmedju elektroda i vrsta metala od koga su elektrode izradjene /L.8/.

Ne ulazeći u sve detalje na ovom mjestu ćemo se zadržati samo na nekim osobinama specifičnim za gas SF_6 kao izolaciju. To su prije svega sam mehanizam proboja u gasu, zatim proboj u gasu u nehomogenom polju, te karakteristike proboja kod najčešćih oblika ispitnih napona.

2.1. Mehanizam proboja u gasu SF_6

Električni proboj rastojanja izmedju elektroda ispunjenog gasom u homogenom polju počinje ubrzavanjem elektrona stvorenim pod uticajem vanjskog ionizatora u električnom polju. Ukoliko je jakost električnog polja dovoljna da da potrebno ubrzanje elektronu, tako da pri sudaru sa neutralnim molekulom dodje do ionizacije, dolazi do formiranja lavine elektrona. Daljnji razvoj procesa odvija se pod djelovanjem fotona a čitav mehanizam se naziva mehanizmom udarne ionizacije po Taunsendu /L.9/. Ova teorija je tačna sve dotle dok zapreminsko naelektrisanje ne izmijeni električno polje. Ako dodje do modifikacije polja, umnožavanje elektrona jako zavisi od prostornog naelektrisanja. Pojačanje polja u ograničenom dijelu prostora izmedju elektroda povećava broj elektrona sekundarne ionizacije koji se "slijevaju" u zonu pozitivnog zapreminskog naelektrisanja koje se proteže u vidu uskog kanala. Ovim kanalom dolazi do stalnog kretanja elektrona. Kad kanal dostigne naspramnu elektrodu dolazi do proboja a mehanizam po kome se proces odvija poznat je pod nazivom "strimerni" /L.1/.

2.1.1. Taunsendov mehanizam

Razvoj proboja u gasu određuje nekoliko parametara od kojih su osnovni: koeficijent udarne ionizacije ili prvi Taunsendov koeficijent α koji daje broj elektrona izazvanih jednim elektronom na putu 1 cm " pravom polja,

koeficijent sekundarne ionizacije δ ili drugi Taunsendov koeficijent koji predstavlja broj sekundarnih elektrona koje sa katode izbija pozitivni ion i koeficijent zahvata η koji označava broj zahvaćenih elektrona od strane molekula na putu od 1 cm u pravcu polja.

Očigledno je da je električna čvrstoća gasa tim veća što je veći koeficijent zahvata elektrona η a manji koeficijent udarne izolacije α .

Koeficijenti α i η nalaze se u veoma složenoj zavisnosti od dimenzije i strukture molekula gasa. Kod gasova sa krupnijim molekulama dolazi do većeg broja sudara po jedinici puta elektrona, uslijed čega se njegova brzina u momentu sudara a time i koeficijent α smanjuje. U visokomolekularnom gasu, kao što je n. pr. SF_6 , zahvaljujući velikom broju mogućih nivoa ekscitacije dolazi do neelastičnih sudara i kinetička energija elektrona se lako potpuno prenosi na molekul. Koeficijent zahvata elektrona u tom slučaju može biti vrlo velik.

Svojstvo vezivanja (zahvata) elektrona tj. elektronski afinitet raste s lijeva u desno i odozdo prema gore u sistemu elemenata Mendeljeva pa je isto maksimalno za elemente F, Cl, Br, O, S, Se koji se nalaze u desnom gornjem uglu tablice. Ovi elementi se nazivaju elektronegativni.

Spoi više elektronegativnih elemenata ima takodje visok elektronski afinitet, to jest koeficijent zahvata elektrona, pa prema tome i gas SF_6 kao jedan od takvih spojeva.

Električna čvrstoća gasa SF_6 određuje se putem koeficijenata α i η i njihove zavisnosti od jakosti električnog polja E (tačnije odnosa E/p gdje je p-apsolutni pritisak u kp/cm^2)

Uslovi za nastanak proboja smatraju se ispunjenim kod $L/9$:

$$\delta \int_0^\alpha \exp \left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] dx = 1 \quad \text{----- (1)}$$

Ovaj kriterij pokazuje da je proboj moguć kod uslova $\alpha/p > \eta/p$ u dovoljno velikom diapazonu umnoška d/p , gdje je d-rastojanje između elektroda u cm.

Granični slučaj predstavlja izraz $\alpha/p - \gamma/p = 0$. Kod gasa SF_6 ova granica je kod $E/p = 117$ a u vazduhu $E/p = 36$ [V/cm. mm Hg]. Odnos ovih veličina približno daje odnose električnih čvrstoća ova dva gasa u homogenom polju /L.8.9/.

2.1.2. Mehanizam strimera

Karakteristično za Townsendovu teoriju proboja je da ona tretira kvazistatičke uslove, tj. napon ostaje stalan sve do proboja. Ovi uslovi su neprimjenjivi za veći broj vrsta proboja sa kojima se srećemo u inženjerskoj praksi a kojima prethodi formiranje prostorno naelektrisanja i deformacije polja.

Prema već opisanoj teoriji strimera za ovakve slučajeve može se prema Peder- senu /L.9,11/ postaviti matematički kriterij proboja.

$$(\alpha_x - \gamma_x) \exp \int_0^x (\alpha - \gamma) dx = G(x, \rho) \quad \text{----- (2)}$$

gdie je x - kritična dužina lavine tj. dužina elektronske lavine u momentu obrazovanja strimera, ρ - gustoća gasa α_x, γ_x - koeficijenti udarne ionizacije i zahvata elektrona u glavi strimera. $G(x, \rho)$ - empirijska funkcija koja se određuje prema probojnim karakteristikama gasa SF_6 u homogenom polju.

Daljim pojednostavljenjima postiže se izraz za uslove strimarnog proboja u elektronegativnim gasovima koji glasi:

$$\int_0^x (\alpha - \gamma) dx = K \quad \text{----- (3.)}$$

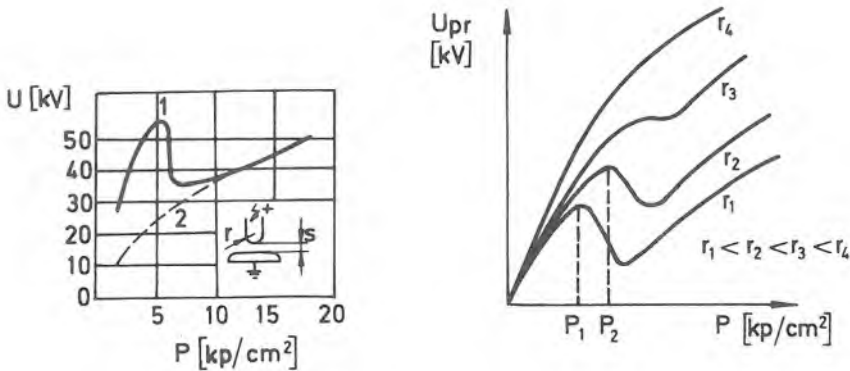
Kod n. pr. sferičnih elektroda radijusa 5 cm rezultati dobiveni izrazom (3) dobro se slažu sa eksperimentalnim rezultatima u gasu SF_6 ako se za faktor K uzme vrijednost 18 za pritiske 1-8 kp/cm², te $k= 22$ za pritiske 6-12 kp/cm² /L.9/.

2.2. Proboj u nehomogenom polju

Već prema obliku elektroda možemo izvršiti klasifikaciju električnih polja na homogeno, nehomogeno i polje sa određenim stepenom nehomogenosti.

Kod homogenog polja, električna čvrstoća SF_6 gasa raste skoro linearno sa povećanjem pritiska, dok se kod nehomogenog polja javljaju određene anomalije

karakteristične za gas SF_6 i to prvenstveno kod pozitivnog polariteta šiljka u konfiguraciji šiljak - ploča.



a.

b.

1. Probajni napon
2. Napon početka tinjanja
kod $r=0,025$ mm i $S=0,3$ cm

Sl. 1. Karakteristike probaja u gasu SF_6 u nehomogenom polju

Na sl. 1 a može se primjetiti, kod određenog pritiska gasa, porast električne čvrstoće a zatim sa povećanjem pritiska nagli pad. Ova pojava se objašnjava time da u jako nehomogenom polju, u uskoj zoni uz elektrodu, dolazi uslijed velike jakosti električnog polja do samostalnog tinjavog pražnjenja. Ionizovani sloj gasa praktično povećava radijus zakrivljenja elektrode i dovodi do homogenizacije polja, što ima za posljedicu nagli porast probajnog napona. Ova pojava je primijećena i kod vazduha i to zbog prisustva elektronegativnog kisika, ali je slabije izražena. Kod aparata izolovanih vazduhom na slobodnoj atmosferi postiže se znatno povećanje probajne čvrstoće izolacije jer se dijelovi aparata dovode na takav oblik da se omogući nastanak t. zv. stabilizovanog tinjanja tj. korone. Korišćenje ovih

podobnosti moguće je samo djelimično kod SF_6 izolacije i to kod prolaznih naprezanja, dok se u trajnom pogonu tinjanje ne smije dozvoliti. Pojava tinjanja u trajnom radu dovela bi do razlaganja gasa.

Što je stepen nehomogenosti električnog polja veći to se uočava veća razlika između vrijednosti napona početka tinjanja i probojnog napona.

Ukoliko se radijus zakrivljenja pozitivne elektrode povećava, tj. polje se homogenizira, maksimum probojnog napona se pomjera u područje većih pritisa (sl.16). Interval između maksimalnog i minimalnog probojnog napona se pri tome skraćuje i u homogenom i kvazi homogenom polju probojni napon monotono raste. Ovdje je takodje karakteristično da se kod povećanja rastojanja između elektroda nepromijenjenog oblika, maksimum probojnog napona pomjera u oblast nižih pritisa a minimum u oblast visokih pritisa. Krive koje se odnose na veća rastojanja obuhvataju krive za manja rastojanja /L.8/.

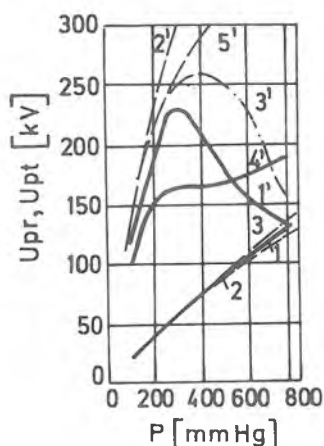
Navedene pojave su posmatrane kod napona jednosmjerne struje a skoro su istovjetne i kod izmjeničnog napona frekvencije 50 Hz.

2.3. Električna svojstva gasa ovisna od vrste ispitnih napona.

Ovdje ćemo se ukratko osvrnuti na ponašanje sumpornog heksafluorida kao izolacionog medija ovisno od vrste ispitnih napona i to sa posebnim osvrtom na dva najčešća oblika: ispitni napon industrijske frekvencije 50 Hz i udarni napon oblika talasa 1.2/50 μs .

Pojave su posmatrane /L.12/ na elektrodama oblika: kugla radijusa 2,0 cm i ploče na udaljenosti 15 cm. Rezultati opita dati su na sl.2.

Kao što je već opisano probojni napon kod izmjeničnog ispitnog napona u toku pozitivne poluperiode, takodje kao i kod pozitivnog istosmjernog napona (krive 1 i 3'), sa povećanjem pritiska dostižu maksimum a zatim opadaju na vrijednost napona početka tinjanja (krive 1 i 3), te pri daljnjem povećanju pritiska pokazuju tendenciju porasta. Mehanizam ove pojave opisan je u prethodnom dijelu. Kod udarnog napona posebno je interesantno ponašanje gasa kod pozitivnog udarnog talasa jer se kod njega dobiva najmanja vrijednost probojnog napona (kriva 4').



- 1 Upt kod pozitivnog istosmjernog napona
- 1' Upr kod pozitivnog istosmjernog napona
- 2 Upt kod negativnog istosmjernog napona
- 2' Upr kod negativnog istosmjernog napona
- 3 Upt kod izmjeničnog napona
- 3' Upr kod izmjeničnog napona
- 4' Upr kod pozitivnog udarnog napona
- 5' Upr kod negativnog udarnog napona

Sl. 2. Probojni naponi (Upr) i napon početka tinjanja (Upt) u ovisnosti od pritiska gasa SF_6 .

Na krivnoj pozitivnog udarnog talasa (kriva 4') primjećuje se slabo izražen maksimum, koji je skoro za dva puta manji od maksimuma kod pozitivnog jednosmjernog probojnog napona.

Na taj način, u oblasti maksimuma probojnog napona u nehomogenom polju, udarni koeficijent (odnos probojnog udarnog napona prema probojnom naponu 50 Hz) može biti manji od jedinice. Ovo je inače veoma bitna karakteristika za sve elektronegativne gasove.

Pojava maksimuma na krivuljama probojnog i istosmjernog i izmjeničnog napona je vezana za pojavu tinjanja i zapreminskog naelektrisanja. Za obe ove pojave potrebno je izvjesno vrijeme. Dokazano je /L.8/ da je to vrijeme manje od polovine trajanja poluperiode industrijske frekvencije (< 5 ms). Pošto se za kratko vrijeme trajanja udarnog talasa ne može formirati prostorno naelektrisanje, udarni probojni napon ima nižu vrijednost nego kod naprezanja izolacije istosmjernim i izmjeničnim naponom. Poslije minimuma krive probojnog udarnog napona pozitivnog polariteta, gdje se ova poklapa sa krivom napona početka tinjanja, udarni koeficijent postaje veći od jedan.

Uticaaj zapreminskog naelektrisanja je sve manji što je polje homogenije.

U malo nehomogenom i praktično homogenom polju prostorno naelektrisanje svakako ne popravlja sliku polja među elektrodama, uslijed čega kriva prostornog udarnog napona u funkciji pritiska i nema maksimuma. U tom slučaju je udarni koeficijent veći od jedan i to sve veći što je polje homogenije.

3. SUMPORNI HEKSAFLUORID KAO SREDSTVO ZA GAŠENJE ELEKTRIČNOG LUKA

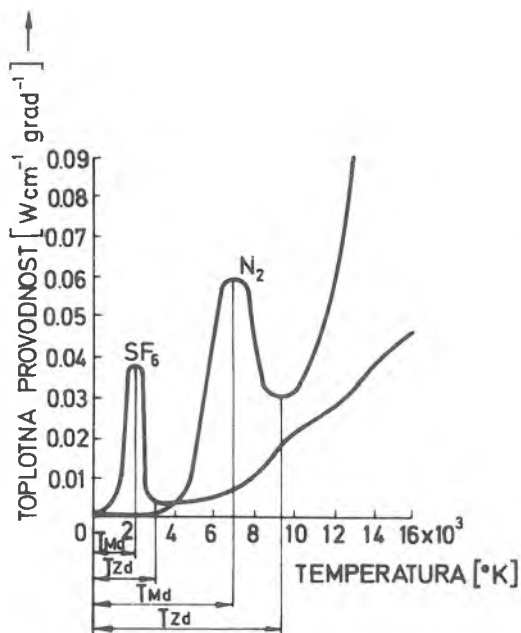
Izbor naizmjenične struje u prenosu i distribuciji električne energije pogodovao je do danas praktično nezamjenljivoj upotrebi električnog luka kao posrednika pri prelasku iz stanja električnog provodjenja u stanje električnog izolovanja u procesu prekidanja električne struje u prekidačima visokog napona. Na ovaj način ne samo da je veoma olakšana problematika prekidanja strujnih krugova, nego je izvršen i odlučujući uticaj na izbor medija za gašenje električnog luka. Obzirom da je gašenje luka u prekidačima visokog napona svedeno na veoma uzan interval vremena u neposrednoj blizini jedne od prirodnih nula struje, plazma upotrebljenog medija za gašenje luka u komori prekidača mora biti u stanju da se u roku $10 - 20 \mu s$ dejonizuje i postane dobar električni izolator, sposoban da se suprostavi porastu povratnog napona i do $10 \text{ kV}/\mu s$. Kako gustina nosilaca elektriciteta u plazmi prvenstveno zavisi od pritiska i apsolutne temperature, za uspješno gašenje luka u prekidačima visokog napona neophodno je izvršiti izuzetno naglo opadanje temperature mediju kontaktnog prostora od oko $10^9 \text{ } ^\circ K/s$ / L.4/ što se teško može susresti u nekoj drugoj oblasti tehnike.

Kao mjera za brzinu opadanja provodnosti medijukontaktnog prostora prekidača koristi se vremenska konstanta opadanja električne provodnosti stabla luka, ili kraće-vremenska konstanta luka. Što je vrijednost vremenske konstante manja, to će gašenje luka biti efikasnije. Vrijednost vremenske konstante luka u momentu nule struje veoma je važna veličina zato što može poslužiti kao mjera za početnu regeneraciju dielektrične čvrstoće medijukontaktnog prostora.

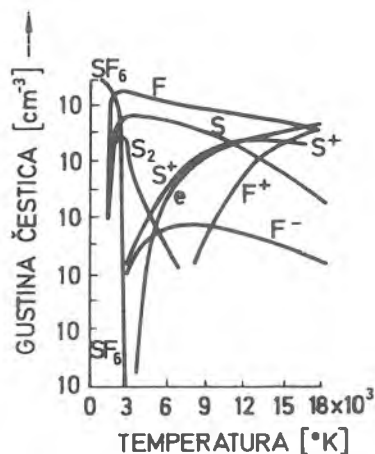
Prisilno oduvavanje luka u prekidačima visokog napona veoma snižava vremensku konstantu luka. Međutim, dok pri većim strujama luka dominira odvođenje toplote konvekcijom, u oblasti oko nula struje preovladava odvođenje toplote putem toplotne provodnosti.

3.1. Toplotna provodnost sumpornog heksafluorida

Toplotna provodnost gasa podvrgnutog lučnom pražnjenju u opštem slučaju sastoji se od dvije komponente. Jedna komponenta je posljedica običnog kinetičkog prenosa energije, a druga komponenta je rezultat difuzije energije usljed disocijacije i jonizacije. Na sl.3 predstavljene su krive promjene toplotne provodnosti SF_6 plazme i azotne plazme u funkciji temperature. Veoma izraženi maksimumi na krivama posljedica su procesa disocijacije gasa. U velikim zonama međukontaktnog prostora dolazi do neelastičnih sudara molekula gasa, pri čemu oni troše energiju disocijacije i raspadaju se na manje dijelove, koji difundiraju u hladnije zone, gdje se rekombinuju, oslobađajući energiju disocijacije u vidu toplote. Maksimum toplotne provodnosti gasa nastupa pri temperaturi kod koje je proces disocijacije gasa najintenzivniji (t.zv. temperatura maksimalne disocijacije - T_{Md}), a minimum pri temperaturi kod koje se proces disocijacije završava (t.zv. temperatura završetka disocijacije - T_{Zd}). Oblik krivih promjene toplotne provodnosti u funkciji temperature sličan je za sve višeatomske gasove, međutim vrijednosti temperatura T_{Md} i T_{Zd} zavise od prirode gasa upotrebljenog za gašenje luka. Mada je T_{Md} kod azota mnogo veća nego kod SF_6 , interesantno je uočiti da je energija disocijacije molekule SF_6 (22,4 eV) oko 2.3 veća nego u slučaju azota (9,7 eV). To se objašnjava činjenicom da su u molekuli SF_6 svih šest atoma fluora sa jednakom energijom vezani za atom sumpora, tako da pri relativno niskim temperaturama (sl.4) od oko 2000 °K molekularni sudari dovode do odvajanja svih atoma fluora, tj. do pune disocijacije $SF_6/L.2./$. Za razliku od SF_6 i azota vodonik ima relativno nisku energiju disocijacije (4,4 eV). koja neznatno utiče na porast relativno visoke klasične toplotne provodnosti ovog gasa.



Sl. 3. Promjena toplotne provodnosti SF_6 plazme i azotne plazme u funkciji temperature /L.13/

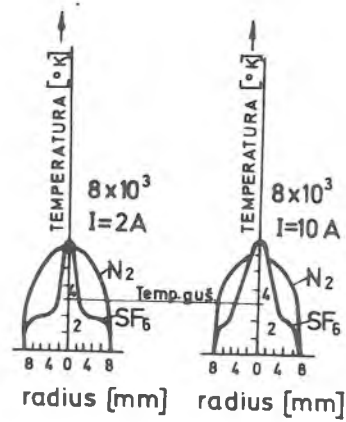
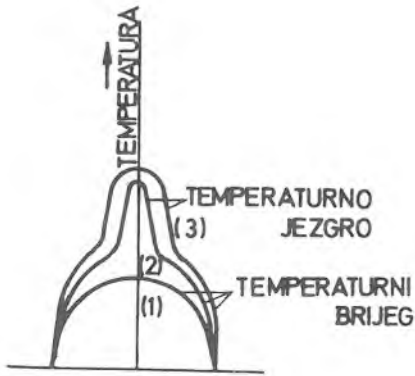


Sl.4. Promjena gustine čestica plazme stacionarnog luka u SF_6 u funkciji temperature /L.13/

3.2. Raspodjela temperature u stablu stacionarnog električnog luka u SF_6 .

Na slici 5. prikazana je kvalitativna slika raspodjele temperature u stablu stacionarnog luka koji egzistira u cijevi poluprečnika r_0 . Sa porastom struje luka dolazi do povišenja temperature ose luka i promjene temperaturnog profila luka. Ako pretpostavimo da se Džulova toplota oslobadja samo u osi luka, tj. da je toplotni fluks Q konstantan,

$$Q = 2 \pi r k \frac{dT}{dr} \quad (4)$$



Sl.5. Kvalitativna kriva raspodjele temperature u stablu stacionarnog luka unutar cijevi poluprečnika r_0

Sl.6. Temperaturni profil stacionarnog luka u SF_6 i u azotu /L.13/.

(r - rastojanje od ose luka, k - toplotna provodnost, T - temperatura), uz zanemarenje malih promjena r slijedi da je

$$k \frac{dT}{dr} = \text{const} \quad (5)$$

Prema tome, smatraćemo da su toplotna provodnost plazme luka i temperaturni gradijent luka međusobno obrnuto proporcionalni /L.3/, iz čega se mogu izvesti slijedeći zaključci:

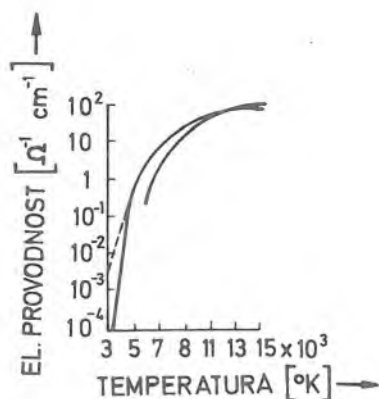
- a) Kad toplotna provodnost plazme luka raste sa porastom temperature luka sve do temperature ose luka, tj. kad temperatura ose luka ne predje temperaturu

- T_{Md} (sl.3) . temperaturni gradijent će opadati prema osi luka i stvorit će se široka oblast t. zv. temperaturnog brijege (sl.5, kriva 1).
- b) U slučaju kad je temperatura ose luka viša od temperature T_{Md} obrazovaće se temperaturno jezgro. Naime, u dijelu luka čija temperatura ne prevazi-
lazi vrijednost T_{Md} dolazi do opadanja temperaturnog gradijenta usljed ra-
sta toplotne provodnosti. Ovo opadanje je najveće u oblasti u kojoj tempera-
tura dostiže vrijednost T_{Md} , te se tu najviše zaravnava temperaturni brijege.
Daljim približavanjem osi luka ulazi se u oblast temperatura viših od T_{Md} ,
što u skladu sa krivom na sl.3. ima za posljedicu pad toplotne provodnosti,
ti porast temperaturnog gradijenta, čija je posljedica pojava temperaturnog
jezgra (sl.5 kriva 2).
- c) Daljim porastom temperature ose luka (na primjer usljed uspostavljanja veće
stacionarne struje luka), nakon prolaska kroz minimum, dolazi do ponovnog
rasta toplotne provodnosti (sl.3.) Ova pojava ima za posljedicu snižavanje
temperaturnog gradijenta u oblasti temperaturnog jezgra, tj. širenje tempera-
turnog jezgra (sl.5, kriva 3).

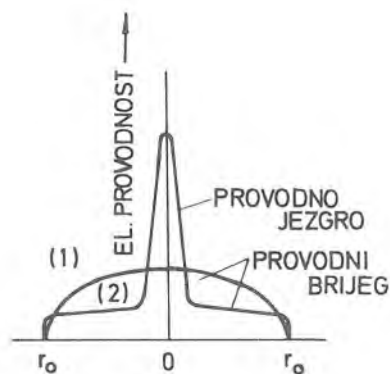
Na slici 6 prikazani su temperaturni profili stacionarnog luka u SF_6 i u azotu pri
istim strujama i istim uslovima hlađenja. Pri manjim strujama luk u SF_6 ima mnogo
tanje jezgro i niži brijege nego luk u azotu, što se u skladu sa prethodnim razma-
tranjem objašnjava nižim temperaturnim nivoom disocijacije i užom temperaturnom
oblašću disocijacije simpornog heksafluorida u odnosu na azot. Međutim,
pri većim strujama luka dolazi do znatnog proširivanja i zaravnivanja tempera-
turnog profila luka u SF_6 koji dostiže i čak može prevazići po širini temperaturno
jezgro luka u azotu /L.7/.

3.3. Raspodjela električne provodnosti i poprečni presjek luka u SF_6

Dio plazme luka koji odgovara temperaturnom jezgru ima mnogo veću električ-
nu provodnost od dijela koji odgovara temperaturnom brijegu. Promjene elek-
trične provodnosti plazme luka u SF_6 i u azotu u funkciji temperature prikazani
su na slici 7. Prema tome, krive raspodjele električne provodnosti (sl.8) imaju



Sl. 7. Promjena el. provodnosti plazme luka u SF_6 i u azotu u funkciji temperature



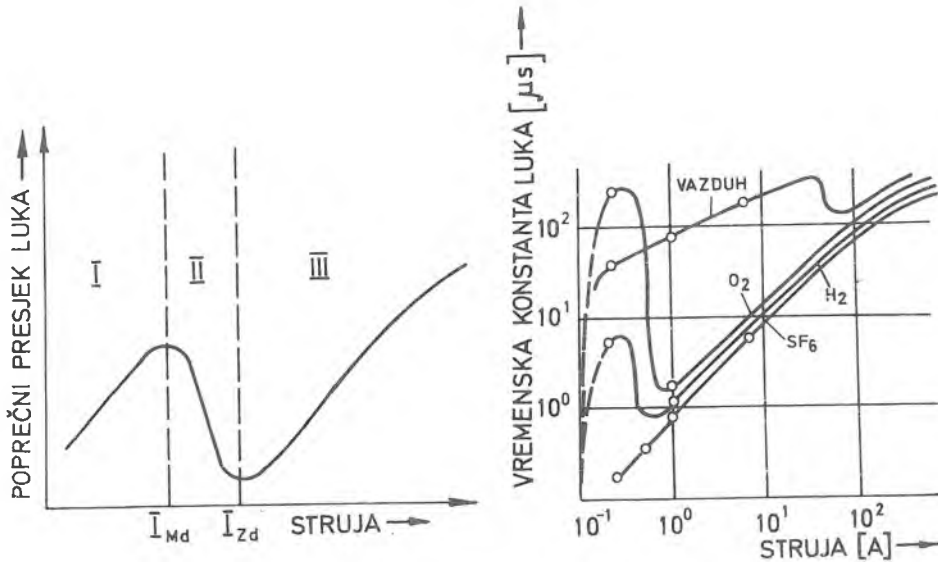
Sl. 8. Kvalitativne krive raspodjele el. provodnosti u stablu luka u cijevi poluprečnika r_0

sličan oblik kao krive raspodjele temperature, tj. u oblasti temperaturnog jezgra formira se područje relativno visoke električne provodnosti - t. zv. provodno jezgro, a u oblasti temperaturnog brijege obrazuje se područje mnogo niže električne provodnosti - t. zv. provodni brijeg. Obzirom da se pod poprečnim presjekom luka Al podrazumjeva presjek najuže oblasti oko ose luka koja praktično provodi cjelokupnu struju luka, to će praktično oblast provodnog jezgra (ako postoji) biti i oblast luka. U slučaju kad nema provodnog jezgra onda će oblast luka pokrivati oblast provodnog brijege.

Kao što se vidi na slici 4 pri temperaturi $T_{Md} \approx 2000^\circ\text{K}$ SF_6 se praktično još uvijek ne jonizuje. Obzirom da temperaturni brijeg kod SF_6 ne prelazi temperaturu T_{Md} , može se zaključiti da se u luku gasa SF_6 praktično ne može

govoriti o električnoj provodnosti temperaturnog brijege, pa prema tome ni o postojanju provodnog brijege. U slučaju luka u azotu, obzirom na relativno visoku vrijednost T_{Md} , oblast temperaturnog brijege znatno prevazilazi temperaturu gašenja ⁽¹⁾, te zadržava znatnu električnu provodnost, što se manifestuje obrazovanjem relativno širokog provodnog brijege (sl.6).

Na slici 9. prikazan je opšti oblik krive promjene poprečnog presjeka stacionarnog luka u funkciji struje.



SI.9 Kvalitativni oblik krive promjene poprečnog presjeka luka / opšti slučaj / u funkciji struje

SI.10. Promjena vremenske konstante luka u funkciji struje kada nema prinudnog strujanja gasa /L.3/

- (1) Pod temperaturom gašenja podrazumjeva se ona vrijednost temperature ispod koje koncentracija slobodnih elektrona nije više dovoljna za održavanje lučnog pražnjenja. Njena vrijednost za većinu gasova nalazi se u području između 2000 °K i 3000 °K.

Pod vrijednošću I_{Md} podrazumijevamo struju luka pri kojoj osa luka dostiže temperaturu T_{Md} , a pod I_{Zd} struju pri kojoj temperatura ose luka postaje jednaka vrijednosti T_{Zd} . Oblast I odgovara slučaju kada u luku postoji samo provodni brijeg. Oblast II odnosi se na slučaj pojave oštrog provodnog jezgra, a oblast III na slučaj kad se provodno jezgro počinje širiti. Na osnovu prethodnog razmatranja može se zaključiti da, za razliku od luka u azotu koji ima sve tri navedene oblasti, luk u SF_6 praktično ima samo oblast III. Drugim riječima, snižavanjem vrijednosti struje luka u SF_6 prema nuli, smanjuje se i poprečni presjek luka do veoma malih vrijednosti. Kod azota i većine drugih gasova pri snižavanju struje ispod vrijednosti I_{Zd} dolazi do povećanja poprečnog presjeka luka.

Prethodno izlaganje odnosilo se na stacionaran luk. U slučaju nestacionarnog luka, koji se javlja kod realnih prekidača, promjene struje luka povezane su sa promjenama električne provodnosti i temperature stabla luka. Simultano odvijanje toplotnih, elektromagnetnih i gasodinamičkih procesa u plazmi nestacionarnog luka veoma otežavaju sveobuhvatno razumijevanje pojava pri gašenju luka u prekidačima visokog napona. Ipak, prethodno razmatranje stacionarnog luka u kvalitativnom pogledu može se primijeniti na nestacionaran luk koji se javlja pri prekidanju naizmjeničnih struja normalne mrežne frekvencije.

3.4. Vremenska konstanta luka u sumpornom heksafluoridu

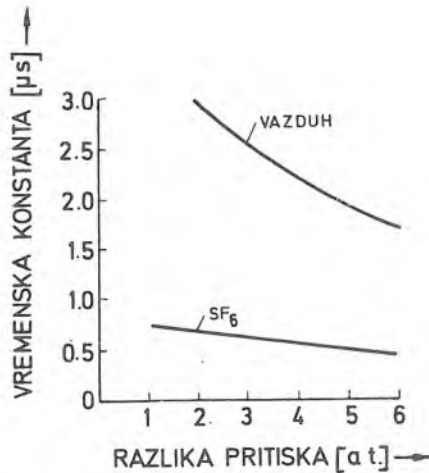
Frind /L.3/ je pokazao da je vremenska konstanta luka proporcionalna presjeku luka, tj.

$$\theta = \frac{S \cdot C}{240^2 \sqrt{k}} \cdot A_e \quad (6)$$

gdje su S - gustina gasa $[g/cm^3]$, C_p - specifična toplota $[J/grad.g]$, k - toplotna provodnost $[W/cm.grad]$.

Iz navedene relacije i zavisnosti poprečnog presjeka luka od struje (sl.9) mogu se izvesti promjene vremenske konstante luka u funkciji struje (sl.10).

Slično krivoj promjene poprečnog presjeka luka u funkciji struje, i kriva promjene vremenske konstante luka ima minimum pri struji I_{Zd} . U slučaju kada nema prisilnog odnavljanja, struja I_{Zd} za SF_6 iznosi ispod 0,5 A, za vazduh oko 50 A a za kiseonik i vodonik 1 A. Prema tome, pri opadanju struje luka u SF_6 prema nuli opadaće i vremenska konstanta luka do vrlo malih vrijednosti. Na slici 11 prikazane su promjene vremenske konstante u funkciji razlike pritisaka ispred i iza komore za gašenje luka u slučaju kada se odnavljanje vrši strujom vazduha i SF_6 . Veoma mala vrijednost vremenske konstante luka u SF_6 predstavlja jednu od najvećih prednosti ovog gasa u poređenju sa ostalim sredinama za gašenje luka.



Sl. 11. Promjena vremenske konstante luka u vazduhu i SF_6 u funkciji razlike pritisaka ispred i iza komore za gašenje luka. Mjerenja izvršena $1 \mu s$ prije nule struje [L.7/].

3.5. Uticaj SF_6 na oblik struje koja se prekida u okolini nule struje

Iz promjene sastava plazme SF_6 u funkciji temperature (sl.4) može se zaključiti da odmah nakon slabljenja procesa disocijacije SF_6 u smjeru rasta temperature

dolazi do obrazovanja slobodnog sumpora koji se lako jonizira, povećavajući na taj način relativno brzo električnu provodnost gasa. Zahvaljujući tome luk u SF_6 ima niske vrijednosti napona i energije kako pri velikim, tako i pri malim strujama. Ovom osobinom luka u SF_6 objašnjava se veoma slab medijustičaj SF_6 prekidača i mreže pri prekidanju vrlo širokog diapazona struja, od par stotina ampera do nazivnih struja kratkog spoja /L.10/. Sa druge strane obzirom da luk zadržava svoje provodno jezgro i pri vrlo malim vrijednostima struje, temperatura i stepen jonizacije u neposrednoj blizini ose luka ostaju relativno visoki. Zahvaljujući tome luk zadržava svoju kompaktnost i pri strujama ispod 0,5 A, te ni relativno jako prisilno oduvavanje ne može izazvati prerano mehaničko istiskivanje plazme strujom hladnog gasa, tj. otsijecanje struje, koja ima za posljedicu pojavu visokih prenapona, što je slučaj kod luka u vazduhu /L.5/. Čak ni u slučaju prisilnog prekidanja struja magnetiziranja prije prirodne nule struje, koje smo obavljali na prototipu SF_6 prekidača, nije dolazilo do pojave značajnijih prenapona. Mala energija luka u SF_6 ima za posljedicu izuzetno veliku električnu trajnost kontakata. Ispitivanja koja smo obavili na prototipu SF_6 prekidača /L.6/ pokazala su da su lučni kontakti prekidača bili vrlo malo oštećeni i nakon deset ciklusa uklopa i isklopa struje kratkog spoja od oko 30 kA. Zahvaljujući malom naponu luka SF_6 prekidači su vrlo pogodni za sintetska komutaciona ispitivanja.

3.6 Uloga procesa zahvata elektrona plazme gasa SF_6 u procesu prekidanja

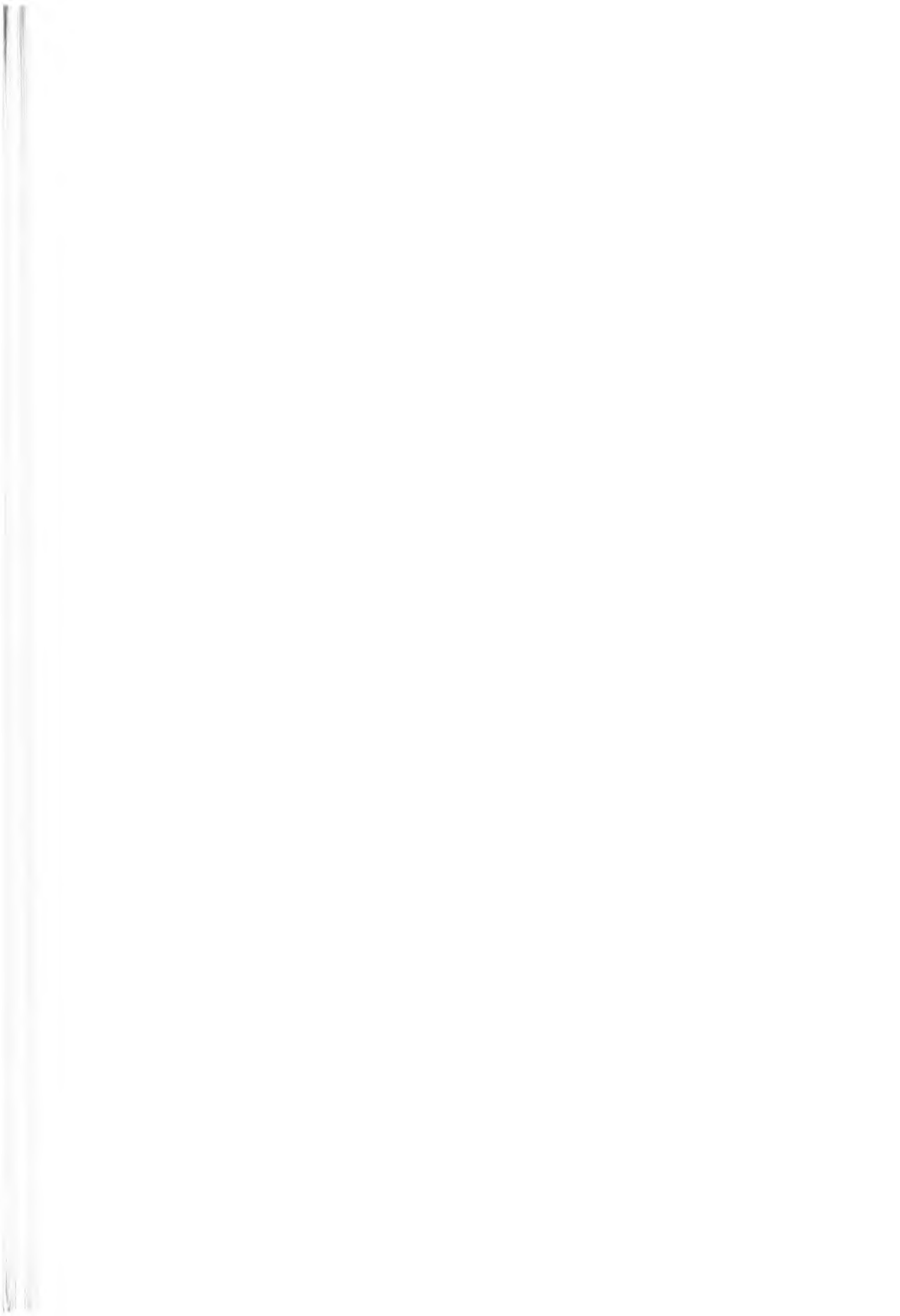
U plazmi gasa SF_6 u intervalu od 3000 do 5000 °K (sl.4) gustina elektrona je znatno manja od gustine pozitivnih jona sumpora, dok je gustina negativnih jona fluora značajna, iako nije moglo doći do jonizacije fluora jer se on značajnije jonizuje tek iznad 17000 °K. Ova pojava, poznata pod nazivom zahvat elektrona, objašnjava se elektronegativnošću fluorovih neutralnih atoma, tj. njihovom sklonošću za pripajanjem slobodnih elektrona. Vodonik i

azot praktično ne posjeduju ovu osobinu, a kiseonik samo u relativno maloj mjeri. Osim fluora i drugi sastojci SF_6 plazme, koji se stvaraju pri rekombinaciji sumpora sa fluorom, imaju veliku elektronegativnost. Obzirom da se pojava zahvata elektrona u plazmi luka SF_6 događa tek u završnoj fazi gašenja luka, njoj se ne može pripisati ozbiljniji uticaj na dobre karakteristike SF_6 u pogledu gašenja luka. Međutim, pojava zahvata elektrona u SF_6 ima odlučujuću važnost za veoma brzi rast i uspostavljanje visoke vrijednosti dielektrične čvrstoće medjuelektrodnog prostora nakon prolaska struje kroz nulu.

LITERATURA

1. Braun C.S.: Uvod u fiziku električnih gasnih pražnjenja.
"Vuk Karadžić", Beograd. 1972.
2. Frie W.: Berechnung der Gaszusammensetzung und der
Materialfunktionen von SF_6 . "Z. Phys.", vol 211 1967.
3. Frind G.: Über das Abklingen von Lichtbogen I. II.
"Zeitschrift für ang. Physik", XII Band, Heft 11, 1960
4. Gajić Z.: Gašenje električnog luka u sumpornom heksafluoridu.
"Elektrotehnika", Nº 6, 1970, Zagreb
5. Gajić Z.: O uticaju sredine za gašenje luka na konstrukciju
prekidača visokog napona. "Elektrotehnika". Nº 1, 1971, Zagreb
6. Gajić Z.: Prekidač za metalom oklopljena postrojenja 123 i 145 kV.
"XII stručno savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije", Budva 1975
ref. br. 13.03
7. Kukekov G.A., Kaplan G.S.: Isledovanie električeskoj dugi
peremennogo toka pri gašenii v šestifloristoe sere.
"Električestvo". Nº 6, 1969.
8. Poltjev A.I.: Elegazovje aparati. "Energija", Leningradskoe
otdjelenie. 1971.
9. Radwan R.H., Salama M.M.: Calculation of breakdown
voltages of electronegative gases (SF_6 and Cl_2 , CF_2).
"IEEE Power Eng. Soc. Conf. Pap. Winter Meet.. New York,
N.Y. 1975", New York 1975.
10. Rieder W.: Schwefelhexafluorid als Schaltmedium.
"Elektrotechnik und Maschinenbau", Vol 87. Nº 1, 1970.
11. Sankgasaad S.: Die elektrische Festigkeit von SF_6 in inhomogenen
Feld bei Gleich- und Wechselspannung.
"ETZ-A" H.11, 1975.

12. Steiniger E.: Durchschlagverhalten von Schwefelhexafluorid bei Gleich-, Wechsel- und Stosspannungsbeanspruchung. "ETZ-A" H. 18. 1965
13. Swarbrick P.: Composition and properties of a sulphur hexafluoride arc plasma. "Brit. J. Appl. Phys.," vol 18. 1967.



Ibrahim Kamenica
Miloš Abadžić
Elektrotehnički fakultet, Sarajevo

MATEMATSKI MODEL DINAMIČKOG ELEKTRIČNOG LUKA I ANALIZA REALNOSTI PRETPOSTAVKI KOJE GA DEFINIŠU

U radu je prikazana hronologija razvoja matematskog modela dinamičkog električnog luka kao i analiza nezavisno postavljenih pretpostavki i pojednostavljenja, koje su omogućile njegovo definisanje. Ovaj prikaz obuhvata početne radove iz ove oblasti i naknadnu dogradnju polaznog modela, koju su izvršili pojedini autori koji su, uz pomoć razvijenih mjernih i računarskih metoda, pokušali modificirati polazni model i približiti ga što realnijem stanju, uvažavajući u većoj ili manjoj mjeri prvobitno postavljene polazne pretpostavke. Ovakvim hronološkim prikazom, te uporednom analizom, želimo dati ocjene realnosti polaznih pretpostavki koje su zajedničke za sve modele kao i onih koje se međusobno razlikuju. U radu je takodjer, kao sinteza, izvršen pokušaj razgraničenja područja i konkretnih praktičnih slučajeva u kojima su razvijene modifikacije realne i primjenljive.

MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC ELECTRIC ARC AND ANALYSIS OF THE REALISM OF THE ASSUMPTIONS DEFINING IT

The development (in chronological terms) of the mathematical dynamic electric arc model, and the analysis of independently developed assumptions and simplifications which have made its definition possible, are presented. The survey comprises the initial studies in this field, and the subsequent expansion of the initial model by several researchers who endeavoured by more sophisticated measuring and computation methods to modify the starting model and bring it, as much as possible, close to reality while appreciating the original hypotheses. Such a chronological survey and comparative analysis are aimed at evaluating the reality of the initial hypotheses, which are common to all models, and of the assumptions which differ from model to model. A synthetic attempt is also being made at setting out the areas and specific practical cases in which the developed modifications are realistic and applicable.

Od pojave prvih prekidača visokog napona, relativno jednostavne konstrukcije, do najnovijih savremenih konstrukcija željelo

se procese u medjukontaktom prostoru prilikom prekidanja fizikalno razjasniti i matematički interpretirati. U početku je ta želja bila više plod pasiva za istraživanjem novih oblasti nauke i tehnike, dok u posljednje vrijeme postaje imperativ radi udovoljavanja sve strožijim tehničko-ekonomskim zahtjevima, koji se postavljaju pred prekidače kao bitne elemente sve složenijih elektroenergetskih sistema. Saglasno sa ovim mijenjao se i stav prema istraživanju procesa u prekidama, te se od skoro amaterskog došlo do čisto profesionalnog pristupa, karakterističnog po značajnijim novčanim ulaganjima, što djelimično objašnjava pojavu sve zapaženijih rezultata na ovom području. S tehničke strane, pojava sve boljih rezultata omogućena je:

- značajnim napretkom u proučavanju plazmo-fizikalnih pojava uopšte,
- napretkom tehnike dijagnosticiranja plazme,
- razvojem uređaja i postupaka za ispitivanje prekidača i
- pojavom računara velikog kapaciteta pogodnih za numeričko rješavanje sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina, s kojim se neminovno sreće kod matematičke interpretacije tako složenih pojava, kakve se odigravaju u stablu luka prilikom procesa prekidanja strujnih krugova.

Što se tiče praktičnih potreba matematičkog interpretiranja pojava kod prekidanja, odnosno, stvaranja matematičkog modela prekidača, može se reći da su one uglavnom dvojake:

- radi računskog proučavanja uticaja konstrukcionih parametara prekidača i osobina medija za gašenje na karakteristike prekidača u različitim uslovima rada, što bi, u krajnjoj liniji, trebalo da omogući proračun optimalne konstrukcije prekidača za unaprijed zadane uslove rada;
- radi proučavanja interakcije prekidača i mreže u kojoj je postavljen, s krajnjim ciljem da se na najracionalniji način efikasno utiče na tok prelaznih pojava u mrežu prilikom djelovanja prekidača bilo u normalnim bilo u abnormalnim uslovima rada.

Značajniji rezultati na ovom području javili su se četrdesetih godina ovog vijeka. Tačnije rečeno od pojave radova Kajso (A.Cassie, L.1) i Majro (O.Mayr L.2) 1939. godine, odnosno 1947. godine modeli dinamičkog luka, nazvani njiho-

vim imenom, predstavljali su dugi niz godina podlogu svakom proučavanju prekidača kao elementa jedne manje ili više složene mreže u različitim režimima njenog rada. Vremenom su ovi osnovni modeli modificirani i poboljšavani, a postavljani su i novi pravci u razvoju ove oblasti da bi se došlo do današnjeg stanja koje je još uvijek daleko od onoga što se smatra krajnjim ciljem razvoja matematičkog modela prekidača. Korisno je sagledati put njihovog razvoja uočavajući slabosti kojima su pojedini od njih bili opterećeni, a samim tim i onemogućeni da dovoljno tačno odraze sve ono što se u međjukontaktom prostoru odigrava prilikom prekidanja.

1. VAŽNIJI MODELI DINAMIČKOG LUKA

1.1. Polazne postavke za modeliranje

Prvobitni pokušaji stvaranja matematičkog modela luka bili su orijentisani na iznalaženje odgovarajućih jednačina koje će dovoljno tačno opisivati sve procese u plazmi luka. Rezultat tih napora bio je sistem od sedam jednačina, uglavnom nelinearnih diferencijalnih jednačina, s veoma složenim početnim i graničnim uslovima, koji je praktično bio nerješiv. Slijedeći korak obuhvatao je uvodjenje čitavog niza pojednostavljenja kako bi se dobio rješiv sistem jednačina. Međutim, rezultati su bili toliko skromni da se na njima ne vrijedi ni zadržavati.

Bolji rezultati su postignuti promatranjem luka kao cjeline, ne upuštajući se u praćenje pojedinačnih pojava u stablu luka i u graničnim njegovim oblastima. Mogućnost za ovakvo promatranje pruža energetski bilans u stablu luka, jer energetski odnosi predstavljaju odraz svih elementarnih procesa u stablu luka, a istovremeno relativno lako se povezuje s veličinama koje karakterišu luk kao dio nekog strujnog kruga. Pri tome se polazi od činjenice da se u stablu luka razvija određena količina energije, koja se zatim troši na kompleks različitih procesa u stablu luka, dok se njen jedan dio odvodi u okolinu i predstavlja gubitak. Energetski bilans čine, dakle, tri osnovne komponente: razvijena energija W_r , odvedena energija W_o i energija akumulirana u stablu luka, odnosno njegova unutrašnja energija Q_s . U opštem slučaju ove tri veličine su promjenljive i međusobno povezane relacijom.

$$Q_s = W_r - W_o \quad (1)$$

Bez obzira na brzinu prometa možemo ove veličine smatrati neprekidnim funkcijama vremena, što čini realnim egzistenciju njihovih izvoda po vremenu, od-

nosno, ovaj izraz pokazuje da se unutrašnja energija u stablu luka mijenja za-

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dW_r}{dt} - \frac{dW_o}{dt} = P_r - P_o \quad (2)$$

visno od uzajamnog odnosa snage koja se u njemu razvija P_r i snage koja se od njega odvodi P_o , a koje su uslovljene djelovanjem vanjskih uticaja (struja, intenzitet hlađenja) i fizičkim osobinama sredine u kojoj luk gori.

Pojam unutrašnje energije, koji ovde koristimo, ima šire značenje i obuhvata ne samo toplotnu energiju čestica sadržanih u promatranoj zapremini, već i energiju disocijacije i jonizacije koje jedan broj tih čestica nosi sa sobom. On se može lako povezati s električnom provodnošću stabla luka, koja je funkcija istog $[g=g(Q)]$, što omogućava da se dodje do izraza (L.32):

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{g'(Q)}{g(Q)} \cdot (P_r - P_o) \quad (3)$$

koji predstavlja opšti oblik matematičkog modela dinamičkog luka. Zbog poznatih relacija izmedju provodnosti, snage, struje i napona, odnosno jačine električnog polja, kada se promatra dio stabla luka jednak jedinici dužine, može se jednačina (3) kombinovati s jednačinom vanjskog strujnog kruga i koristiti za određivanje toka struje i napona, uz pretpostavku da su poznati funkcija $g(Q)$, a da je stablo luka cilindrično i da je zanemariv uticaj prielektrodnih oblasti. Veličina $g(Q)$ i Q mogu se tačno odrediti iz bilansa snaga luka i graničnih uslova, ali bi taj zadatak bio matematički nesavladiv ukoliko se ne bi preduzela pogodna pojednostavljenja. Više autora je pokušalo ovaj problem riješiti uvođenjem pogodnog sistema pretpostavki, pa su dolazili do odgovarajućih matematičkih modela dinamičkog luka, čija je primjena, nažalost, davala zadovoljavajuće rezultate samo u posebnim slučajevima, u kojima je učinjen sistem pretpostavki najviše odgovarao toku procesa u medjukontaktom prostoru prekidača premoštenom električnim lukom.

Samoj izradi matematičkog modela može se prići s dva stanovišta:

1. Polazeći od matematičkih izraza svih elementarnih procesa u medjukontaktom prostoru uvoditi postepeno pogodne pretpostavke i pojednostavljenja sve dok se ovi izrazi ne svedu na rješiv oblik. Medjutim, njegova primjena krije u sebi opasnost da zanemareni uticaj ili proces ima u pojedinim slučajevima značajnu ulogu, što bi uzilo područje primjene tako dobivenog modela.

2. Koristeći se mjerenjima na realnom prekidaču, u manjem broju slučajeva njegovog rada, doći do potrebnih informacija koje će dozvoliti matematičku prognozu rada istog prekidača u svim ostalim mogućim slučajevima. Kod ovog postupka se polazi od opšteg modela prekidača, odnosno luka, a iz eksperimentalnih podataka se određuje zakon promjene pojedinih veličina i njihov međusobni uticaj, ne zanemarujući ni jedan od procesa koji se pri tome odvija u medjukontaktom prostoru.

U oba ova slučaja potrebno je odlučiti promjenom koje veličine želimo predstaviti rad prekidača u sistemu. Iz zahtjeva prekidačima proizlazi da je to otpor, odnosno provodnost stabla luka.

Prvi postupak je isključivo korišten u ranijim radovima, dok se primjena drugog postupka javlja u posljednje vrijeme.

1.2. Matematički modeli dobiveni uproštavanjem fizičke slike procesa u prekidačima

Na ovaj način je dobiveno više matematičkih modela dinamičkog luka, od kojih su dva ključna. To su modeli Kejsa (A.Cassi, L.1) i Majra (O.Mayr, L.2). U međuvremenu su mnogi autori unosili u ove modele izvjesne dopune i modifikacije kako bi ih prilagodili određenim uslovima primjene, ali su osnovne osobenosti ova dva modela ostale i dalje.

1.2.1. Kajsijev model

Za postavljanje svog modela, koji se oslanja na razvijanje jednačine (2), autor je postavio čitav sistem pretpostavki, koristeći se pretežno zapažanjima dobivenim iz eksperimentalnih radova s modelom pneumatskog prekidača. Važnije od tih pretpostavki su: temperatura stabla luka je ista po cijeloj njegovoj zapremini, odvodjenje toplote od stabla luka vrši se samo putem strujanja. Koeficijent odvodjenja toplote je konstantan, poprečni presjek stabla luka je srazmjeran jačini struje, specifična toplota gasa u stablu luka ne zavisi od temperature i vremena. Iz usvojenih pretpostavki neposredno proizilazi:

- provodnost po jedinici dužine stabla luka srazmjerna je njegovom poprečnom presjeku i specifičnoj provodnosti,
- odvedena snaga po jedinici dužine stabla luka srazmjerna je njegovom poprečnom presjeku i koeficijentu odvodjenja toplote ,
- sadržaj toplote po jedinici dužine stabla luka srazmjeran je njegovom poprečnom presjeku i specifičnoj toploti ,

- za male promjene struje luka slabo se mijenja njegova provodnost, što dovodi do pojma statičkih karakteristika luka iz kojih se iz vodi za Kejsijev model karakteristična vrijednost stacionarnog napona. U_s

Koristeći se ovim konstatacijama lako svodimo jednačinu (2) na oblik

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_k} \left[\left(\frac{u}{U_s} \right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

u kojoj τ_k predstavlja tzv. toplotnu vremensku konstantu luka određenu u ovom slučaju izrazom

$$\tau_k = \frac{C}{\alpha} \quad (5)$$

Izraz (4) označavamo kao Kejsijev matematički model dinamičkog luka.

Osnovne karakteristike ovakvog modela luka su slijedeće:

- Toplotna vremenska konstanta luka, ili kratko vremenska konstanta luka, je veličina koja se ne mijenja tokom vremena i ne zavisi od jačine struje, već se njena vrijednost vezuje, preko veličina koeficijenta odvodjenja toplote i specifične toplote, za osobine sredine u kojoj luk gori, i konstrukciona rješenja samog prekidnog mjesta prekidača.

- Statički napon luka ima stalnu vrijednost za široko područje struja luka uz uslov da se izuzmu male vrijednosti struja. Eksperimentalno je ova pretpostavka potvrđena za struje reda više kiloampera.

Promatrajući u svjetlu ovih pretpostavki luk naizmjenične struje, lako se dolazi do zaključka da Kejsijev matematički model može biti dobro primjenjen za veći dio poluperiode dok struja ima veliku vrijednost, ali da u području prolaska struje kroz nulu, pogodnost primjene ovog modela dolazi u pitanje. Ovo je ozbiljan nedostatak Kejsijevog matematičkog modela luka, pošto je, kod proučavanja prelaznih pojava i ostalih procesa vezanih za rad prekidača, područje prolaska struje kroz nulu vremenski interval u kojem pada odluka o uspješnosti gašenja luka i karakteru pratećih prelaznih procesa.

1.2.2. Majrov model

Majr polazi takodje od jednačine (2) da bi došao do svog matematičkog modela dinamičkog luka, ali to on čini pod pretpostavkama od kojih se neke razlikuju u odnosu na one utemeljene u Kejsijev model. Jedna od osnovnih razlika je u pretpostavci da se odvodjenje toplote od stabla luka vrši isključivo provodjenjem. Ovu pretpostavku Majr je dopunio zaključkom, baziranim na eksperimentalnim poda-

cima dobivenim za male struje, da je snaga luka, odnosno snaga hlađenja stabla luka, približno konstantna. ($P_0 = \text{const}$)

Smatrajući stablo luka ispunjeno idealnim gasom, Majr je došao do veze, između provodnosti stabla luka i sadržaja toplote, slijedećeg oblika

$$G = \text{const} \cdot \frac{Q}{Q_s} \quad (6)$$

gdje je karakteristični sadržaj toplote stabla luka koji dovodi do promjene njegove provodnosti u odnosu 1:e. Diferenciranjem po vremenu jednačine (6) i zamjenom u jednačini, dolazimo do izraza

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{U \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (7)$$

koji predstavlja Majrov matematički model dinamičkog luka. Unjemu je toplotna vremenska konstanta luka određena izrazom

$$\tau_m = \frac{Q_s}{P_0} \quad (8)$$

Osnovne karakteristike Majrovog modela su slijedeće:

- vremenska konstanta luka je veličina koja se ne mijenja vremenom i ne zavisi od jačine struje. Njena vrijednost je preko specifične toplote i koeficijenta provodjenja toplote vezana za osobine sredine u kojoj luk gori.
- Budući da je konstantnost snage hlađenja eksperimentalno potvrđena za male vrijednosti struje, to je ovaj model pogodan za lukove male struje, što upućuje na zaključak da bi kod naizmjenične struje Majrov model bio pogodan za proučavanje područja u blizini prolaska struje kroz nulu.

Ove osobine čine, već na prvi pogled, Majrov model pogodnim za proučavanje prolaznih procesa u trenutku gašenja luka, odnosno u vremenskom intervalu u kojem isčezava dotada prisutna provodnost luka.

Rezultati koje je postigao Majr i drugi autori upotrebom ovog matematičkog modela dinamičkog luka, pokazuju u nizu slučajeva dobro kvalitativno simuliranje stvarnih pojava, ali se većinom ne dobivaju zadovoljavajući kvantitativni odnosi, koji su u proučavanju stvarnih problema veoma značajni.

1.2.3. Dopune osnovnih modela luka

Nepodesnost da se jedan od navedena dva matematička modela dinamičkog luka primjene za praćenje pojava tokom cijele poluperiode i vremenskog intervala,

u kojem se, kod uspješnog gašnja luka poslije prolaska struje kroz nulu, obavi regeneracija dielektrika u medjukontaktom prostoru, dovelo je do pokušaja njihovog dopunjavanja i proširivanja područja primjene.

Prvi zahvat u tom smislu učinili su Kejsi i Mejns (F.O.Masson) (L.5) koji su pokušali objediniti fizikalne postavke na kojima počivaju oba modela. Dobiveni model trebao bi da predstavlja luk prije i poslije prolska struje kroz nulu. Medjutim, rezultat je bio znatno povećavanje matematičke složenosti tako dobivenog modela luka. Ova okolnost je dovela do toga da ovako proširen model luka nije našao neku primjenu u analizi prelaznih režima kod prekidanja i proučavanju uloge i mogućnosti prekidača pri tome.

Braun (T.E.Browne) (L.4,10) je pokušao dati sintezu osnovnih modela luka, zadržavajući jednostavnost, na takav način da kombinuje njihovu primjenu tokom jedne poluperiode. Kejsijev model, s njegovim stalnim naponom luka, primjenjivao bi se tokom najvećeg dijela poluperiode dok struja ima veliku vrijednost. Majrov model, pak, primjenjivao bi se u intervalu prolaska struje kroz nulu kada, čak i kod prekidanja velikih struja, jačina struje pada na malu vrijednost. Budući da je u većini slučajeva proučavanja prelaznih procesa interesantno ovo prelazno područje, normalno je da se tada koristi Majrov model, dok bi Kejsijev poslužio za određivanje početnih uslova kod rješavanja Majrove jednačine.

U cilju stvaranja daljih matematičkih olakšica Braun je predložio još slijedeća pojednostavljena:

- prije prolaska struje kroz nulu, stablo luka je određeno jedino vanjskim električnim kolom,

- nakon prolaska struje kroz nulu uspostavljanje napona na kontaktima određeno je jedino vanjskim električnim kolom.

Ove pretpostavke svakako još više udaljavaju model luka od realnosti i uticaja prekidača na tok procesa pri prekidanju predstavljaju samo preko tri konstante (toplotna konstanta luka, napon luka i snaga hladjenja), ali istovremeno svode odgovarajuće jednačine na lakše rješiv oblik.

Kod primjene Braunovog modela luka problem se može javiti u vezi s odabiranjem trenutka u kojem treba preći sa Kejsijeve na Majrovu jednačinu. Osim toga, vrlo je vjerovatno da oko tog prelaznog trenutka postoji vremenski interval u kojem obje jednačine manje tačno opisuju ponašanje luka.

Precizna mjerenja preostalih struja i povratnih napona pokazala su da u pojedinim slučajevima interakcije prekidača i mreže za vrijeme prekidanja dolazi do izvjesnih odstupanja izmjerenih vrijednosti i vrijednosti dobivenih primjenom matematskog modela luka. Ovo odstupanje je naročito značajno u slučajevima povratnih napona velike strmine. Teorijsku obradu ovog problema dali su Rider (W.Rieder) i Urbanek (J.UrbaneK) (L.18) razvijajući tzv. teoriju termički neuravnoteženog luka. Medjutim, ovim je postignuto objašnjenje nastalih odstupanja i dat način za prevazilaženje nastalog problema, ali je istovremeno model luka ponovo postao složeniji. Prema njihovom prijedlogu proračun luka bi se vršio parcijalno, koristeći se u pojedinim intervalima različitim modelima luka, na slijedeći način:

- Za područje velikih struja proračun luka bi se vršio upotrebom Kejsijeveg modela.
- U području prolaska struje kroz nulu, koristio bi se Majrov model, uz napomenu da bi bilo potrebno u prelaznom području primijeniti složeniji model Kejsa i Mejsona.
- Ukoliko bi poslije prolaska struje kroz nulu bili mali i preostala provodnost iz termina povratnog napona mogao bi se i dalje koristiti Majrov model.
- Ako bi, pak, preostala provodnost bila mala, a strmina povratnog napona velika, morala bi se za proračun koristiti teorija termički neuravnoteženog luka po Rideru i Urbaneku.

Očigledno je da primjena ovakvog postupka nije jednostavna, a da je uz to postignut stepen tačnosti, još uvijek ugrožen mnogim pretpostavkama i pojednostavljenjima na kojima se svi ovi modeli zasnivaju. Zbog toga je praktični značaj ovog i ostalih navedenih modela luka mali, a rezultati, dobiveni njihovom primjenom, skromne vrijednosti.

Značaj navedenih matematičkih modela ugrožen je još više radovima koji su pokazali da toplotna vremenska konstanta luka nije konstantna veličina i da se mijenja naročito u intervalu oko prolaska struje kroz nulu, kada se u medjukontaktom prostoru odigravaju mnogi procesi od čijeg toka zavisí hoće li do prekidanja doći ili ne. Prvi ozbiljniji rad iz ovog područja objavio je Frind (G.Frind) (L.11), a njegove postavke su potvrđene i od drugih autora. Kako promjene vrijednosti vremenske konstante luka mogu biti veoma značajne, one mogu ozbiljno ugroziti, a to i čine, vjerodostojnost rezultata dobivenih proračunom u postupku zasnovanom na nepromjenljivoj vrijednosti vremenske konstante luka.

Takodje je i postavka o nepromjenljivoj odvedenoj snazi P_0 , odnosno napona U_s , nerealna obzirom na tok procesa u medjukontaktном prostoru, što ozbiljno remeti tačnost prikazivanja istih i umanjuje vrijednost rezultata dobivenih ovim modelima. Ne iznenadjuju zbog toga pokušaji da se modelirañju luka pridje na nov način.

1.2.4. Švarcov model

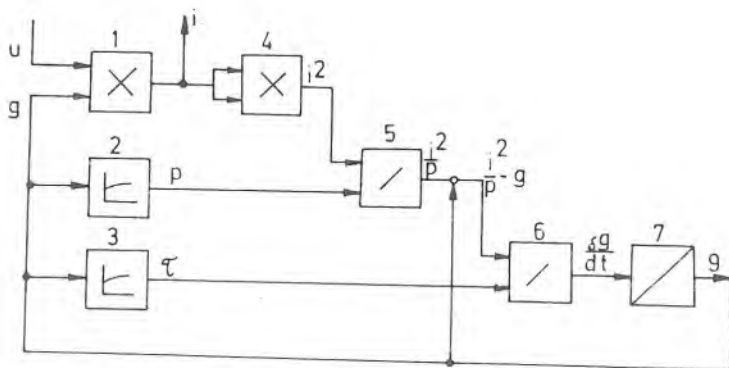
Švarc (I.Schwarz) (L.38) je predložio model koji se otklanja na Majerov model, pri čemu on umjesto konstantnog τ_m i P_0 uvodi odgovarajuće promjenljive, kao funkcije provodnosti luka $\tau(g)$ i $P_0(g)$. Za opisivanje luka on koristi slijedeće jednačine:

$$\frac{dg}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot g = \frac{1}{\tau p} \cdot i^2 \quad (9)$$

$$p = p(g) \quad (10)$$

$$\tau = \tau(g) \quad (11)$$

a sam model naziva dvostruko modificirana Majrova jednačina. I ovom slučaju se dinamički predstavlja ekvivalentni dvopolom određene provodnosti, koji se preko relacije $i = g \cdot u$ uključuje u sistem jednačina, postavljen za opis električnog kruga, čiji je integralni dio i promatrani luk.



Sl.1. Blok šema Švarcovog modela dinamičkog luka.

Navedene tri jednačine, koje predstavljaju ovaj model dinamičkog luka, mogu se predstaviti blok šemom kao na slici 1. Izuzimajući probleme izrade programa za obradu na računaru pojedinih slučajeva kritičnih konfiguracija električnih krugova i režima rada prekidača, koji su, konačno, tehničke prirode, osnovni problem je određivanje zavisnosti $p(g)$ i $\mathcal{T}(g)$. Autor je predložio da se taj problem riješi kombinovanjem što tačnijeg snimanja oscilograma napona luka i preostale struje tokom prekidanja strujnih krugova realnim (promatranim) prekidačem i proračuna prelaznih režima u strujnim krugovima čiju jednu granu predstavlja promatrani prekidač. Iz oscilograma struje i napona relativno lako se dobiva zavisnost $p(g)$, a zatim se iterativnim postupkom proračuna dolazi do vrijednosti zavisnosti $\mathcal{T}(g)$ koje dovode do podudaranja proračunatih i eksperimentalno dobivenih vrijednosti.

Ukoliko bi željeli svrstati ovaj model u navedena dva pristupa modeliranju, teško bi mogli to precizno učiniti, jer djelomično udovoljava zahtjevima i jednog i drugog pristupa. Naime, jednačina (9), izvedena je iz Majrove jednačine, koja je, kao što smo vidjeli dobivena poslije veoma značajnih pojednostavljenja i pretpostavki, uzimajući samo da su toplotna vremenska konstanta i odvodna snaga funkcije provodnošćumedjukturaktnog prostora, odnosno luka. Povezivanje sa provodnosti luka, i ovaj smisao u činjenici da upravo vrijednost provodnosti i njena promjena predstavljaju odraz svih procesa u medjukturaktnom prostoru jednog prekidača, koji su upravo takvi zahvaljujući geometrijskim parametrima istog i osobinama upotrebljenog medija za gašenje. Kako se obje ove zavisnosti određuju na osnovu eksperimentalno dobivenih rezultata, možemo ih smatrati vanjskim karakteristikama prekidača, s kojima se srećemo kod drugog pristupa modeliranju.

Koristeći se Švracovim modelom i uzimajući neku od karakterističnih veličina mreže ili prekidača kao slobodno promjenljiv parametar, možemo proučavati kako njihov uticaj na rad prekidača, tako i na ponašanje mreže u kojoj je promatrani prekidač postavljen.

1.3. MODELI DINAMIČKOG LUKA DOBIVENI PROUČAVANJEM NJEGOVIH VANJSKIH KARAKTERISTIKA

Ovaj put u modeliranju luka novijeg je datuma. Zasniva se na proučavanju vanjskih konstatacija i lako mjerljivih veličina, kao i odgovarajućoj matematičkoj interpretaciji.

Značajna karakteristika ovakvog pristupa je da se praktično ne zasniva na bilo kakvim pojednostavljenjima i zanemarivanjima već ponašanje luka promatra kao posljedicu odigravanja cijelog kompleksa procesa, koji egzistiraju u sva-

kom prekidaču, a čiji je značaj u svakom posebnom slučaju teško unaprijed prognozirati. Kao ograničenje se može shvatiti to što se promatranje usredsređuje samo na manji broj veličina, kao što su napon i struja luka, odnosno njegova provodnost. Međutim, ovo ograničavanje se mora shvatiti uslovno jer se rad prekidača, kao što je na samom početku rečeno, može promatrati preko promjene njegove provodnosti.

Osnovu za ovakav pristup promatranju luka dao je Hohrajner (A. Hochreiner) (L.20) Kao osnovne postavke on navodi:

1. Prekidač se promatra kao dvopol čija je električna provodnost određena u svakom trenutku i iznosi:

$$g = g(t) \quad (12)$$

2. Svakoј struji luka odgovara električna provodnost

$$G = G(i) \quad (13)$$

koja se uspostavlja ako struja i , kod neizmjenjenih vanjskih uslova, teče kroz luk dovoljno dugo vremena. Ova provodnost odgovara tzv. statičkoј karakteristici luka. Pri tome se mora primjetiti da se kod promjene stanja medjukontaktnog prostora mogu dobiti različite statičke karakteristike. Pošto se ovo stanje vremenom mijenja, to će G zavisiti ne samo od struje, već i od vremena. Ipak se može pretpostaviti sa velikom vjerovatnoćom da promjena vanjskih uslova za medjukontaktни prostor, tokom promatranih malih vremenskih intervala, nije velika i da se vremenska promjena G može obuhvatiti promjenom G sa strujom i .

3. Stvarna električna provodnost g , koja postoji u svakom trenutku, teži statičkoј provodnosti G svakog trenutka brzinom proporcionalnoј razlici provodnosti $G - g$, odnosno

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{1}{\tau} (G - g) \quad (14)$$

gdje τ predstavlja vremensku konstantu, koja ne mora uopšte biti konstantna veličina.

4. Pretpostavlja se da su veličine g i G rastuće funkcije svog argumenta.

Ova pretpostavka je korištena kod svih matematičkih modela luka, spomenutih naprijed, a bila je, osim toga često puta eksperimentalno potvrđivana.

Iz ovih postavki (Hohrajnerova hipoteza luka) proizilazi da bi se ponašanje luka moglo opisati, ako bi poznavali samo njegovu statičku karakteristiku i vremensku konstantu. Obje ove karakteristične veličine trebale bi biti određene mjerenjem za neki specijalni luk u realnom prekidaču, čime bi dobivene vrijednosti održavale sveukupnost procesa koji se u prekidaču odigravaju. Problem se svodi na određivanje ovih karakterističnih veličina na što jednostavniji način, ne žrtvujući pri tome tačnost.

1.3.1. Digitalni model luka

Gruc (A. Grutz) (L.21,26) je uspio, koristeći se postavkama Hohrajnera da postavi digitalni model luka, omogućivši time da se proučavanje prekidača i njegove interakcije s mrežom vrši na digitalnom računaru. U svom razmatranju on je počeo od jednačine (14), koja se svodi na oblik

$$\frac{dg}{dt} - \frac{g}{\tau} = \frac{G}{\tau} \quad (15)$$

s opštim rješenjem

$$g(t) = e^{-\int_{t_0}^t \frac{dt}{\tau(t)}} \left[-\int_{t_0}^t \frac{G(t)}{\tau(t)} \cdot e^{t_0 \int \frac{dt}{\tau}} \cdot dt + g_0(t) \right] \quad (16)$$

U rješavanju ove nelinearne diferencijalne jednačine nije moguće otići dalje, pošto G zavisi od i , a i , zbog interakcije luka i mreže, zavisi od g . Mora se zbog toga, kao i u slučaju drugih nelinearnih diferencijalnih jednačina, primijeniti postupak korak po korak. Naravno, da se vremenski intervali moraju uzeti dovoljno mali, kako bi unutar njih mogli smatrati konstantnim veličine G i τ .

Za proračun se koristi postupak superpozicije, prema kojem se struja luka sastoji od dvije komponente:

- Jedna komponenta je struja i_k koja bi tekla u kolu, kada bi luk bio premošten idealnom kratkom vezom bez otpora i napona. Ova struja se može lako izračunati prema pravilima proračuna mreže.

- Druga komponenta i_d , deformaciona struja, koja bi se dobila ako bi premostili izvor napajanja i ostavili da djeluje samo napon luka. Kod prekidača visokog napona, napon luka je mali u odnosu na napon mreže, pa je i deformaciona struja mala u odnosu na vršnu vrijednost struje kratkog spoja. Ona ipak doprinosi da ubrzanje prolaska struje kroz nulu ukupna struja $i = i_k - i_d$ odstupa od toka struje i_k , što se lako da zaključiti iz oscilograma.

Postupak pretpostavlja da su poznati $G(i)$ i $\tau(t)$, odnosno $\tau(i)$. Polazi se od para vrijednosti u_0 i i_0 u nekom trenutku t_0 , kada su poznati G_0 , τ_0 i g . Koristeći se jednačinom (15) možemo za trenutak $t_1 = t_0 + \Delta t$ odrediti vrijednost $g(t)$ iz koje slijede $i_1(t_1)$, $u_1(t_1)$ i $G_1(t_1)$, čime se dobivaju početne vrijednosti za slijedeći korak. Osnovno je da se dužina vremenskog intervala odabere tako da se ne ugrozi pretpostavka o konstantnosti veličina G i τ u njemu. Proračuni su pokazali da se zadovoljavajući rezultati dobivaju za slučaj kada se uzme da korak iznosi $\Delta t = 0,01\tau$.

Proračunom treba obuhvatiti dovoljno dug vremenski interval oko prolaska struje kroz nulu kako bi se uočilo eventualno nastojanje ponovnog proboja ili tok povratnog napona, u slučaju da je prekidanje uspješno obavljeno.

Osım ovoga autor je pokazao kako se može jednostavno, na osnovu jednog snimanja struje i napona luka, u slučaju neuspjelog prekidanja u promatranom prolasku struje kroz nulu, doći do karakterističnih veličina $G(i)$ i $\tau(i)$, potrebnih za obavljanje predloženog proračuna. Potrebno je samo pomoću snimljenih krivih odredjivati parove g i $\frac{dg}{dt}$ s jedne i druge strane nule struje i dobiti odgovarajuće vrijednosti za G i τ , koristeći se izrazima

$$\tau = \frac{g_2 - g_1}{g'_1 - g'_2} \quad (17)$$

$$G = \frac{g_2 \cdot g'_1 - g'_1 \cdot g_2}{g'_1 - g'_2} \quad (18)$$

Predložen postupak je pokazao da ima višestruku namjenu.

Njime se mogu proučavati:

- uticaj parametara mreže na prenašenje prekidača kod prekidanja
- uspostavljanje prelaznog povratnog napona na kontaktima prekidača za pojedine slučajeve prekidanja.

Jedini uslov, koji opisan postupak mjerenja postavlja, je potreba da se mjerenje struje i napona obave što tačnije.

Digitalni model luka je novijeg datuma i još nije korišten za proučavanje praktičnih problema. Autor je, doduše, vršio provjeru valjanosti postupka interpretirajući rezultate ispitivanja drugih i postigao veoma dobro podudaranje rezultata. Bilo bi dobro, zbog toga, izvršiti odgovarajuća provjeravanja prije no što se odluči za upotrebu digitalnog modela luka, što u ostalom važi i za bilo koji drugi model koji nam stoji na raspolaganju.

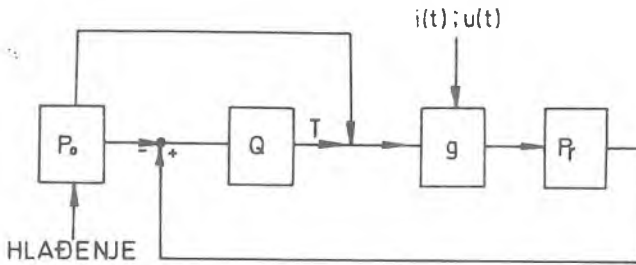
1.3.2. Kibernetiski model luka

U posljednjem radu Hohrajnera (L.24) predložen je nov pristup modeliranja luka, pogodan za obradu na analognom računaru, kod kojeg se luk promatra kao regulaciono kolo s povratnom spregom. Primjena ovog postupka (nazivan kratko regulacioni postupak) zasniva se na pretpostavci da osnovu egzistencije luka čini energetske bilans u njegovom stablu, tj. da u njemu razvijena energija mora biti jednaka odatoj, i da se svaki poremećaj ove ravnoteže mora uravnotežiti jednim unutrašnjim regulacionim postupkom, o čemu govori i jednačina (2). Luk se i u ovom slučaju predstavlja dvopolom promjenljive provodnosti, kroz koji protiče struja $i(t)$ i stvara pad napona $u(t)$. Povećavanjem sadržaja energije u luku, uslijed povećanja razvijene energije, povećava se temperatura u stablu luka što izaziva dva suprotna efekta

- povećava se provodnost luka čime se smjenjuje razvijena energija i
- povećava se odvodna energija.

Kao rezultat imamo uravnoteženje energetskog bilansa, ali na jednoj višoj temperaturi. U slučaju smanjenja struje odnosi su obrnuti, ali se regulacioni proces ponovo pokreće i dovodi do uravnoteženja energetskog bilansa. Koristeći se metodologijom regulacione tehnike, možemo luk predstaviti šemom prikazanom na sl. 2.

U njoj odata snaga P_0 zavisi od hlađenja luka (dakle, od konstrukcije prekidača) i od njegove temperature. Provodnost luka, zavisi od temperature, sa strujom



Sl. 2. Šematsko predstavljanje električnog luka

daje napon luka i snagu koja se u luku razvija P_r . Razlika snaga $P_r - P_0$ određuje sadržaj energije Q , koji preko temperature T i povratne snage utiče na ponovno uspostavljanje ravnotežnog stanja.

Autor je pokazao da se regulacionim postupkom može od jednačine (2) dobiti jednačina (14), koja je korištena kod digitalnog modela luka. Osim toga pokazao je da vremenska konstanta luka nije konstantna i da se može objasniti statističko ponašanje luka u prekidačima. Po riječima autora analogni model luka, postavljen na prikazani način, mogao bi poslužiti za ispitivanje interakcije prekidača i mreže koristeći se modelom mreže. Medjutim, da bi se došlo do upotrebljivog analognog modela luka mora se, na osnovu eksperimentalnih podataka snimljenih za pojedine tipove prekidača, odrediti karakter promjene pojedinih veličina i karakter samo povratne snage. Vjerovatno bi se moglo jedinstvenim eksperimentalnim postupkom doći do potrebnih podataka za postavljanje i digitalnog i kibernetiskog modela luka.

Osim teoretskih razmatranja, preko kojih je pokazana fizikalna opravdanost postavljanja kibernetiskog modela luka i prodiskutovan značaj pojedinih veličina, autor se nije upuštao u sintezu nekog određenog modela luka, koji bi poslužio i za praktičnu provjeru njegovih vrijednosti i mogućnosti primjene za analizu problema rada elektroenergetskih sistema u konkretnim uslovima. Medjutim, taj posao bi se morao svakako obaviti prije nego što bi model luka, stvoren na ovom principu, bio meritorno upotrebljen. Uvažavajući osnovne postavke utemeljene u kibernetiski model luka, čini se da bi se takav napor isplatio.

3. L I T E R A T U R A

1. A. Cassie
A New Theory of Rupture and Circuit Saverity
CIGE 1939, N° 102
2. O. Mayr
Beitrage zur Theorie des statischen und
des dynamischen Lichtbogens
Arch.fur Elektrotechnik 1943. H.12, S.588...608
3. O. Mayr
Uber die Theorie des Lichtbogens und seiner
Loschung
FTZ-A, Bd 64 (1943), S.645...652
4. T.E.Browne
A stuby of A-C Arc Beharier Near Current
Zero by Means of Mathematical Models
AIEE Transactions vol.67 (1946), P.141...153
5. A.M.Cassi, F.O.Mason
Post arc Conductivity in Gas Blast Circuit
Breaker
CIGRE 1956, N° 103
6. O. Mayr
Aufgaben und Losungen aus der Theorie
des Gasentladung, vor allem des Lichtbogens
Anwendung elektrischex Rechenanlagen
in der Starkstromtechnik
VDE Verlag, Berlin 1958
7. E.Schmidt
Ein Beitrag rum dynamischen Lichtbagen-
vexchalten im Stromnulldurchgang von
Wechselstromschaltern
Anwendung elektrischex Rechenanlagen
in der Starkstromtechnik
VDE Verlag, Berlin 1958.
8. V.Rieder P.Sokob
Probleme der Lichtbegendynamik: Rasche
Strom - und Langenenderungen von
Lichtbogen
Sci, electr.Bd.V. (1959) H.3, S.93...112

9. P. Baltensperger
The Shape and Magnitude of Overvoltages
when Interrupting Small Inductive and
Capacitive Currents in H.V. Systems
BBC Review, Vol.47 (1960) N^o 4, P 195...224
10. T.E. Browne
An Approach to Mathematical Analysis of A-C
Arc Extinction in Circuit Breakers
AIEE Transactions, Vol 77 (1959), P.1508...1516
11. O. Frind
Über das Abklingen von Lichtbogen I. und II.
Zeitschrift für angewandte Physik XII Bd. (1960)
H.5. S.231...236, H.11, S.515...521
12. H. Koplin
Das dynamische Verhalten von Lichtbogen
im Wechselstromkreis
Archiv für Elektrotechnik XLVII, H.1-1962, S.47...60
13. H. Koplin
Untersuchung des Löschverhalten eines 110 kV
Expansionsschalters mit Hilfe einer Nach-
stromme apparatur
Disertacija
14. W. Rieder
Die Bedeutung des Schaltlichtbogens
BBC Mitteilungen, Bd.49 (1962), Nr. 9/10, S.398...403
15. K.N. Yoon, T.E. Browne
A Study of the Dinamic Response of Arcs: Time
Constants of Low-Current Arcs under Small Air Flow
IEEE, December 1963, P.1003....1014
16. P. Baltensperger
Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete der
Schaltvorgänge und der Schalterprüfung
BBC Mitteilungen, Bd.49 (1962), Nr.9 /10, S.381...397
17. W. Rieder, J. Pratl
Das Löschen und Wiederzünden von
Schaltlichtbogen
Sci. Electrica XI (1965), S.33...48

18. W.Rieder, J.Urbánek
Nouveaux aspects des recherches de l'effet
du passage à zéro du courant sur les
rearmages dans les disjoncteurs. Une the-
orie des conditions de non-equilibre
thermique des arcs
CIGRE 1966, N° 107
19. J.Pratl
Zum Problem der Grenzstromstärke des
Düssenschalters
Diss. T.H.Wien 1968.
20. A.Hochreiner
Einige Bemerkungen zum Stromnulldurchgang
in Wechselstromschalter
E und M, Bd. 87 (1970), S.15...19
21. A.Grütz
Rechnerische Untersuchung von Leistungs-
schaltern mit Hilfe einer verallgemeinerten
Lichtbogen-theorie
Diss. TH Aachen 1970.
22. B.W. Swanson, R.M. Raitt, T.E. Browne
Arc Cooling and Short Line Fault Inter-
ruption
IEEE vol.90 (1971), P.1094...1102
23. J.Schwarz
Dynamisches Verhalten eines gasbeblasenen
turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens
ETZ-A, Bd 92 (1971) H.6, S.389...391
24. A.Hochreiner
Eine regelungstechnische Betrachtung
des elektrischen Lichtbogens
ETZ-A, Bd. 92 (1971), H 6, S.367...371
25. J. Urbánek
The Time Constant of High Voltage Cir-
cuit Breaker Arcs before Current Zero
IEEE Vol. 59 (1971), P. 502...507

26. A.Grutz, A.Hochreiner
Rechnerische Untersuchung von Leistungsschaltern mit Hilfe einer verallgemeinerten Lichtbogen­theorie
EAZ-A, Bd. 92 (1971), H.4. S.185...191
27. B.W.Swanson, R.M.Michael, T.E.Browne
A Thermal Arc Model for Short - Line Fault Interruption
ETZ-A, Bd. 93 (1972) H.7, S.375...380
28. J.Urbaneck
Zur Berechnung des Schaltverhaltens von Leistungsschaltern, eine erweiterte Mayr - Gleichung
ETZ-a, Bd. 93 (1972), H7, S.381...385
29. J.Schwarz
Berechnung von Scholtvorgängen mit einer zweifachmodifizierten Mayr - Gleichung
ETZ-A, Bd. 93 (1972) H.7, S.386-389
30. H.Brakelmann
Berechnung des Verhaltens von Leistungsschaltern mit Hilfen der Lichtbogenbe­dingungen von A.Hochreiner unter Benut­zung des unbeeinflussten Einschwing­spannung
ETZ-A, Br. 93 (1972) H.7, S.419...420
31. K.Krause
Modell für den statischen und dyna­mischen Lichtbogen
ETZ-A, Bd. 93 (1972) H7, S.421...423
32. W.Rieder
Plasma und Lichtbogen
Fridr. Vieweg & Schön, Braunschweig, 1967
33. W.Weizeb, R.Rompe
Theorie elektrisches Lichtbogen und Funken
Berfh, Leipzig, 1949
34. W.Rieder
Circuit breakers - Physical and engineering problems
IEEE Spectrum, juli 1970, p.35....43, august 1970, p.90...94
septembex 1970, p.80...84

35. E. Slamecka
Prüfung von Hochspannungs - Leistungsschaltern
Springer Verlag, Berlin 1966
36. H.G. Thiel
Die Zusammensetzung eines Zweitemperaturenplasmas in
chemischen Reaktionsgleichgewicht
Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN 44 (1971) 3,5. 123...133, 4B
37. H.G. Thiel
Die Transportkoeffizienten und Materialfunktionen
eines Plasmas mit unterschiedlicher Elektronen-
und Gastemperatur
Wiss.ber. AEG-TELEFUNKEN , 45 (1972) B,S.109...122
38. J. Schwarz
Berechnung von Scholtvorgängen mit einer
zweifach modifizierten Mayr - Gleichung
Dis. TH Darmstadt 1973.

Nikola Kopčić, dipl.inž.
"Rade Končar" Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

ODREDJIVANJE OSNOVNIH KARAKTERISTIKA ELEKTROMAGNETA RAČUNSKIM I EKSPERIMENTALNIM PUTEM PRI RAZVOJU SKLOPNIKA

U okviru razvoja sklopnika, razvoj elektromagneta kao pogonskog dijela sklopnika iziskuje poseban tretman budući da se radi o rješavanju niza ni- malo jednostavnih zadataka električne, magnetske, toplinske i mehaničke prirode.

Ovaj rad daje osvrt na način rješavanja važnijih problema pri razvoju novog elektromagneta s detaljnijom obradom dimenzioniranja kratkospojnih prstenova jednofaznih izmjeničnih elektromagneta.

DETERMINATION OF FUNDAMENTAL ELECTROMAGNET CHARACTERISTICS BY CALCULATION AND EXPERIMENT IN THE DESIGN OF CONTACTORS

In the design of contactors the development of electromagnets as their working parts demands special consideration because it poses a number of rather difficult problems of an electrical, magnetic, thermal and mechanical nature. magnetic, thermal and mechanical nature.

Ways of dealing with major problems in developing new electromagnets, and the detailed design of monophas alternating electromagnet short-circuit rings, are discussed.

x x x x x

1. Uvod

U suvremenoj automatizaciji upravljanja pomoćnim i energetske struj- nim krugovima povjeravaju se sklopniku mnogobrojne i veoma važne funkcije. Stalno prisutna tendencija porasta stupnja automatizacije rezultira, pored osta- log, i sve rigoroznijim zahtjevima u pogledu pouzdanog rada sklopnika. Za

udovoljavanje takvim zahtjevima polaznu pretpostavku čini sveobuhvatni razvoj sklopnika sasvim odredjenih karakteristika. U okviru tog razvoja potreban je poseban tretman elektromagneta kao pogonskog dijela sklopnika. Razvoj elektromagneta zahtijevanih karakteristika obuhvaća rješavanje niza nimalo jednostavnih zadataka električne, magnetske, toplinske i mehaničke prirode. U tom je nizu na prvom mjestu proračun privlačne sile za razne položaje kotve elektromagneta, tj. za razne iznose zračnog raspora. Time se odredjuju osnovne polazne dimenzije elektromagneta s privlačnom silom za svaki iznos radnog zračnog raspora većom od protusila, koje elektromagnet u sklopniku treba svladavati. Budući da u otvorenom položaju zračni raspored iznosi desetinu i više od ukupne duljine magnetskog kruga elektromagneta, magnetsko polje je nehomogeno uz pojavu znatnih rasipnih magnetskih tokova, proračun sile predstavlja veoma složen zadatak (L.4, L.6). Zadovoljavajuća točnost postiže se računanjem veoma složenih izraza u iterativnom postupku čija je provedba teško zamisliva bez korištenja digitalnog računala. Pa i pored toga neophodno je potrebna verifikacija tog računskog postupka točnim mjerenjem privlačne sile na konkretnom elektromagnetu (L.5). Usporedba rezultata mjerenja i računa daje mogućnost dogradnje računskog postupka za pojedine karakteristične oblike elektromagneta.

Na elektromagnetu s tako odredjenim polaznim dimenzijama slijedi provedba analize dinamičkog procesa tokom uklapanja. Privlačna sila elektromagneta u odnosu na protusilu mora biti dovoljno veća da je osigurano besprijekorno privlačenje kotve elektromagneta u granicama $(0,85 - 1,1)$ struje vrijednosti nominalnog napona uzbudnog svitka. Ali taj višak sile mora biti u prihvatljivim granicama koje rezultiraju iz analize dinamičkog procesa pri uklapanju elektromagneta.

Veća razlika u korist privlačne sile vodi na veća ubrzanja i jače udarce kotve o jezgru elektromagneta, a posljedica toga je jače habanje polnih površina te njihovo nedopustivo deformiranje. Ako se ima u vidu da se od suvremenih sklopnika zahtijeva da im mehanička trajnost bude i preko 10 milijuna sklapanja, onda postaje jasno od kolikog je značaja međusobna prilagodjenost sila, odnosno zadovoljavajući dinamički proces pri zatvaranju elektromagneta.

Za konačno dimenzioniranje uzbuđnog svitka i magnetskog kruga elektromagneta neophodna je provedba proračuna elektromagneta u zatvorenom položaju. Time se dobiju iznosi uzbuđne struje, magnetskog toka te gubitaka u bakru i željezu. Ti podaci su neophodni za sagledavanje toplinskih prilika i graničnog zagrijavanja u pojedinim dijelovima elektromagneta. Kod jednofaznih izmjeničnih elektromagneta u okviru toga potreban je zaseban tretman kratkospojnih prstenova u cilju njihovog ispravnog dimenzioniranja.

2. Dimenzioniranje kratkospojnih prstenova jednofaznih izmjeničnih elektromagneta

Kod jednofaznih izmjeničnih elektromagneta privlačna sila varira između nule i maksimuma s dvostrukom frekvencijom napona uzbuđnog svitka. To znači da u području, gdje privlačna sila poprima iznos nula, protusila postaje veća i dolazi do vibracija kotve elektromagneta. To u zatvorenom položaju elektromagneta dovodi do nedopustivog brujanja. Za reduciranje ove pojave na prihvatljiv iznos, stavljaju se u polove elektromagneta kratkospojni prstenovi, kojima se osnovni magnetski tok Φ , u području polova elektromagneta, razlaže na dio kroz prsten Φ_k i izvan prstena Φ_v s međusobnom faznom razlikom $\mathcal{L}$. Time, gledano sumarno, magnetski tok i privlačne sile ni u jednom trenutku ne poprimaju iznos nula, što rezultira smanjivanjem vibracija kotve u zatvorenom položaju elektromagneta.

Kod razvoja elektromagneta s jednofaznom izmjeničnom uzbuđom dimenzioniranje kratkospojnih prstenova sastoji se u određivanju njihovih parametara (djelatni otpor, R_2 i omjer površine koju prsten obuhvaća prema ukupnoj površini pola, a) da se dobiju odgovarajući magnetski tokovi Φ_k i Φ_v te kut $\mathcal{L}$, zbog čega će privlačna sila u zatvorenom položaju elektromagneta biti $F_{\min} > 0$. Odnosno, za konkretan slučaj, gdje je iznos protusile F_p , treba biti zadovoljen uvjet $F_{\min} > F_p$.

Kako je kratkospojni prsten samo jedan element kompletnog magnetskog kruga, to ga valja promatrati isključivo u toj cjelini, uzimajući u obzir ove međusobne utjecaje. Parametri kratkospojnog prstena trebaju, dakle, slijediti kao

rezultat proračuna kompletnog magnetskog kruga u zatvorenom položaju konkretnog elektromagneta. Rezultat tog proračuna, a time i iznosi parametara, su to pouzdaniji što se u većoj mjeri obuhvate stvarne prilike u magnetskom krugu. Takav računski postupak predstavlja složen posao, koji se u cijelosti i sa zadovoljavajućom brzinom može provesti jedino korištenjem digitalnog računala.

U slijedećem se daje dijagramski prikaz nekih rezultata takvog proračuna magnetskog kruga elektromagneta s kratkospojnim prstenovima u zatvorenom položaju.

Na slici 1. dat je izgled stvarnog a), i pojednostavljenog b) oblika te nadomjesna shema magnetskog kruga c). Za proračun je korištena kompleksna metoda (L.1; L.2; L.3). Vektorski prikaz pojedinih veličina magnetskog kruga dat je na slici 2. Utjecaj parametara kratkospojnih prstenova na struju uzbuđenog svitka I_1 , kut $\mathcal{L}$, ukupne gubitke u elektromagnetu P_w , te minimalnu silu F_{min} ilustriraju slike 3, 4, 5 i 6. Izvanredno veliki utjecaj efektivnog zračnog raspora σ_0 u zatvorenom položaju elektromagneta vidljiv je iz slike 7. Ilustracija usporedbe rezultata računa i mjerenja magnetskih tokova data je na slici 8.

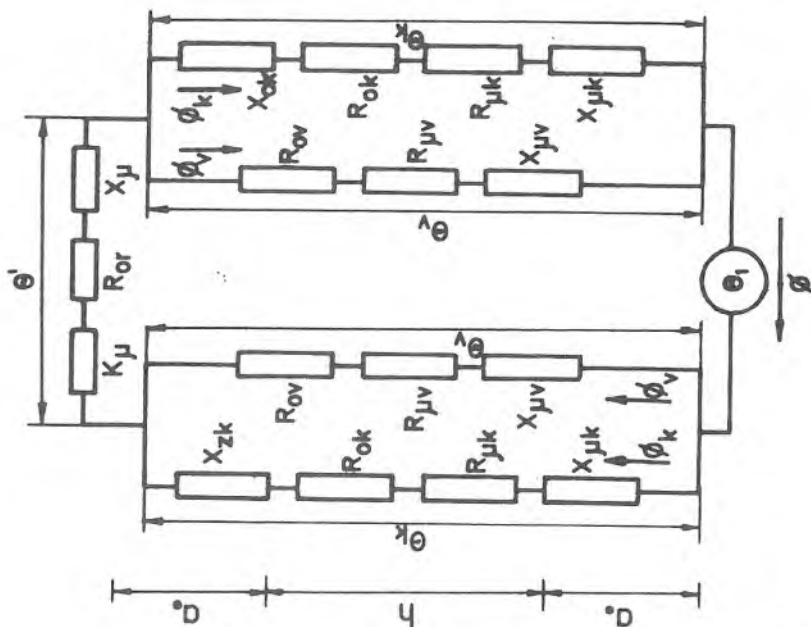
3. Zaključak

Prethodni prikaz, mada u krajnje skraćenom obliku, jasno ukazuje na golem utjecaj kratkospojnih prstenova na prilike u magnetskom krugu elektromagneta. Iznos minimalne sile može varirati u veoma širokim granicama, što ovisi o odabranim parametrima kratkospojnih prstenova kao i o iznosu efektivnog zračnog raspora u zatvorenom položaju elektromagneta. Stoga bez dvojbe slijedi da izboru parametara kratkospojnih prstenova treba pri razvoju jednofaznih izmjeničnih elektromagneta za sklopnike posvetiti punu pažnju.

4. Literatura

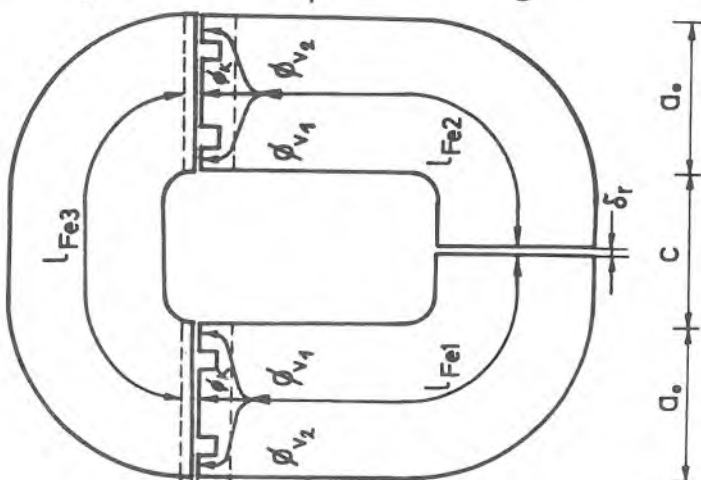
1. Breer, W. DIMENSIONIERUNG VON ELEKTROMAGNETEN FÜR SCHÜTZE MIT EINEM DIGITALRECHNER
Neues von Sprecher, Mitteilungen 1973 Nr.3/4

2. Gerstmann, B. EINPHASEN-ELEKTROMAGNETE MIT KURZSCHLUSSRING
Elektrotechnik und Maschinenbau, H. 5/1958
3. Bulj, B.k. OSNOVI TEORII I RASČETA MAGNITNIH CEPEJ
Izdatelstvo, "Energija", Moskva 1964
4. Jurjević, V. OSNOVI PRORAČUNA ELEKTROMAGNETA U NISKONAPON-
SKIM APARATIMA
"Informacije Rade Končar" broj 40/1966
5. Kopčić, N. PROBLEM TOČNOG MJERENJA STATIČKE KARAKTERISTIKE
ELEKTROMAGNETA ZA SKLOPNIKE
"Elektrotehnika" Zagreb, br. 6, 1974
6. Roters, H.C. ELECTROMAGNETIC DEVICES
John Wiley and Sons, Inc., New York, 1945



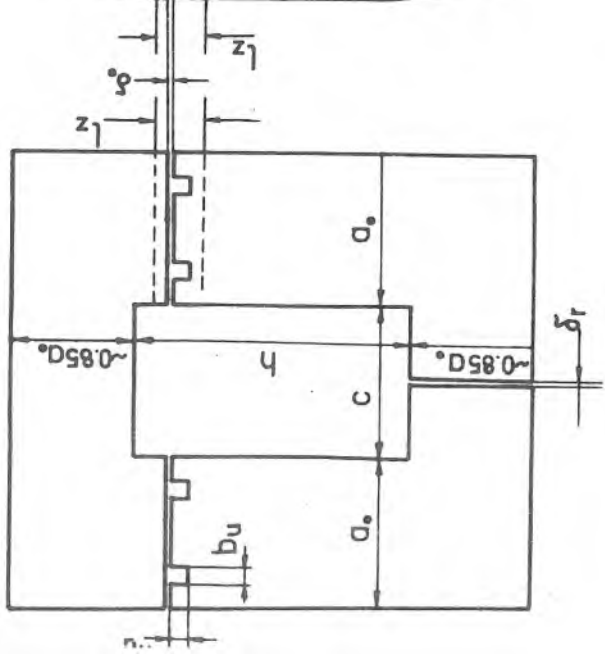
$$\Theta_k = \Theta_v = \Theta''$$

c)



$$l_{Fe} = l_{Fe1} = l_{Fe2} = l_{Fe3}$$

b)



a)

Fig. 1

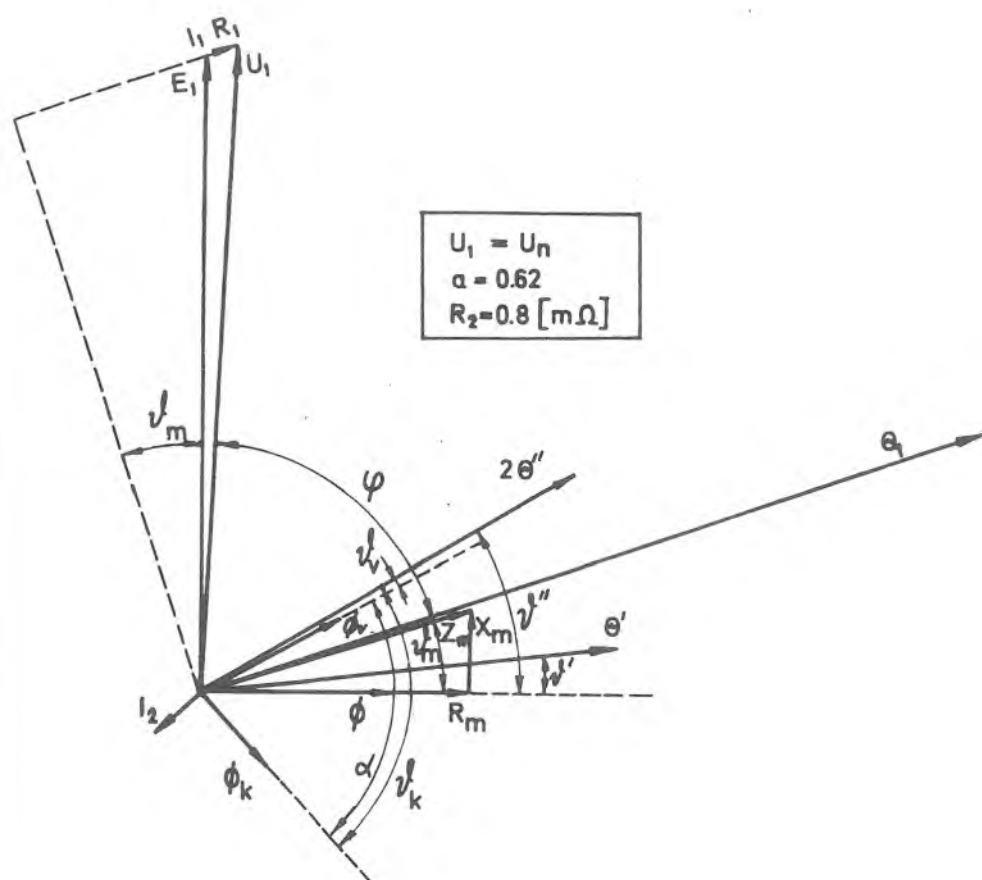


Fig. 2

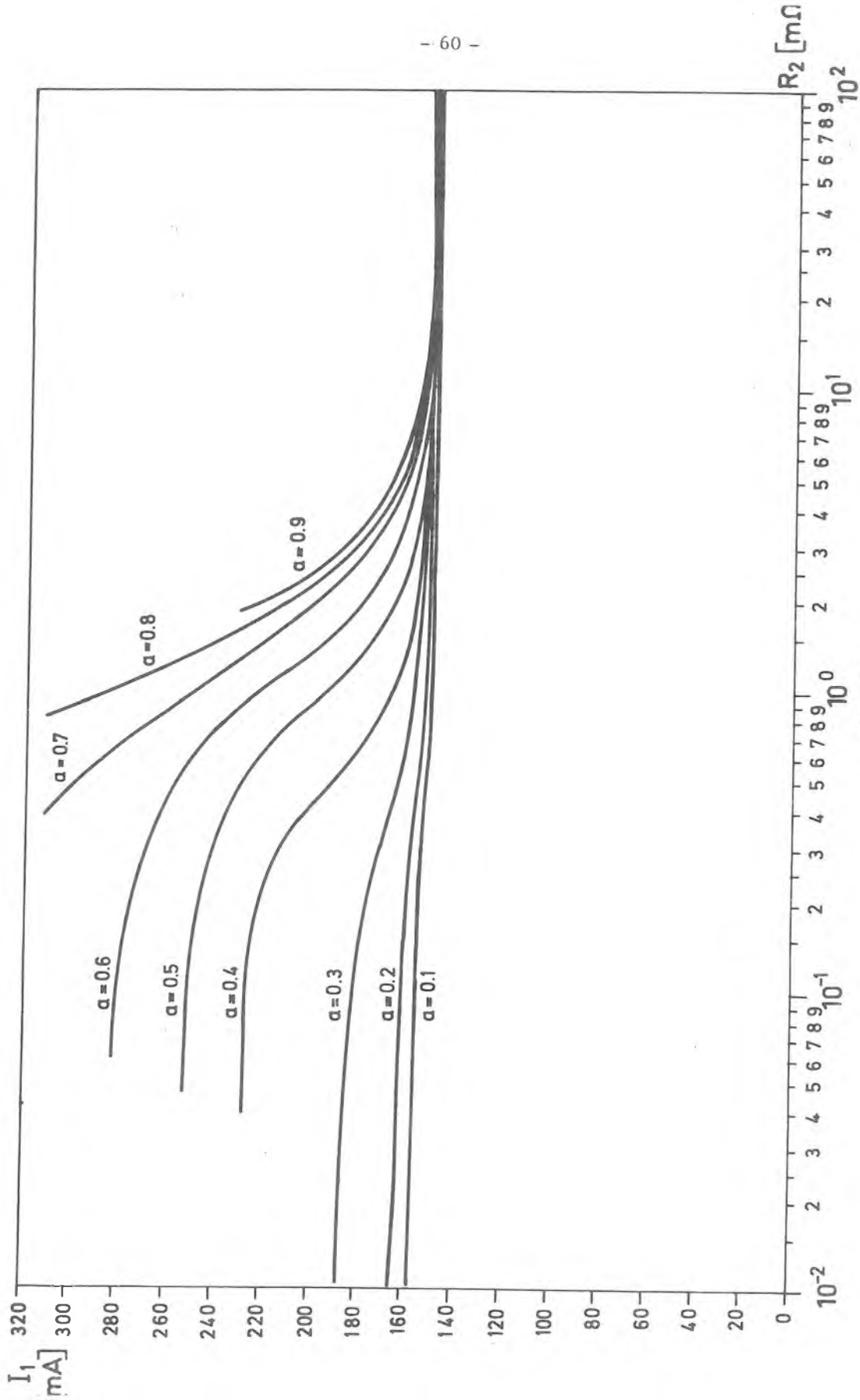


Fig. 3

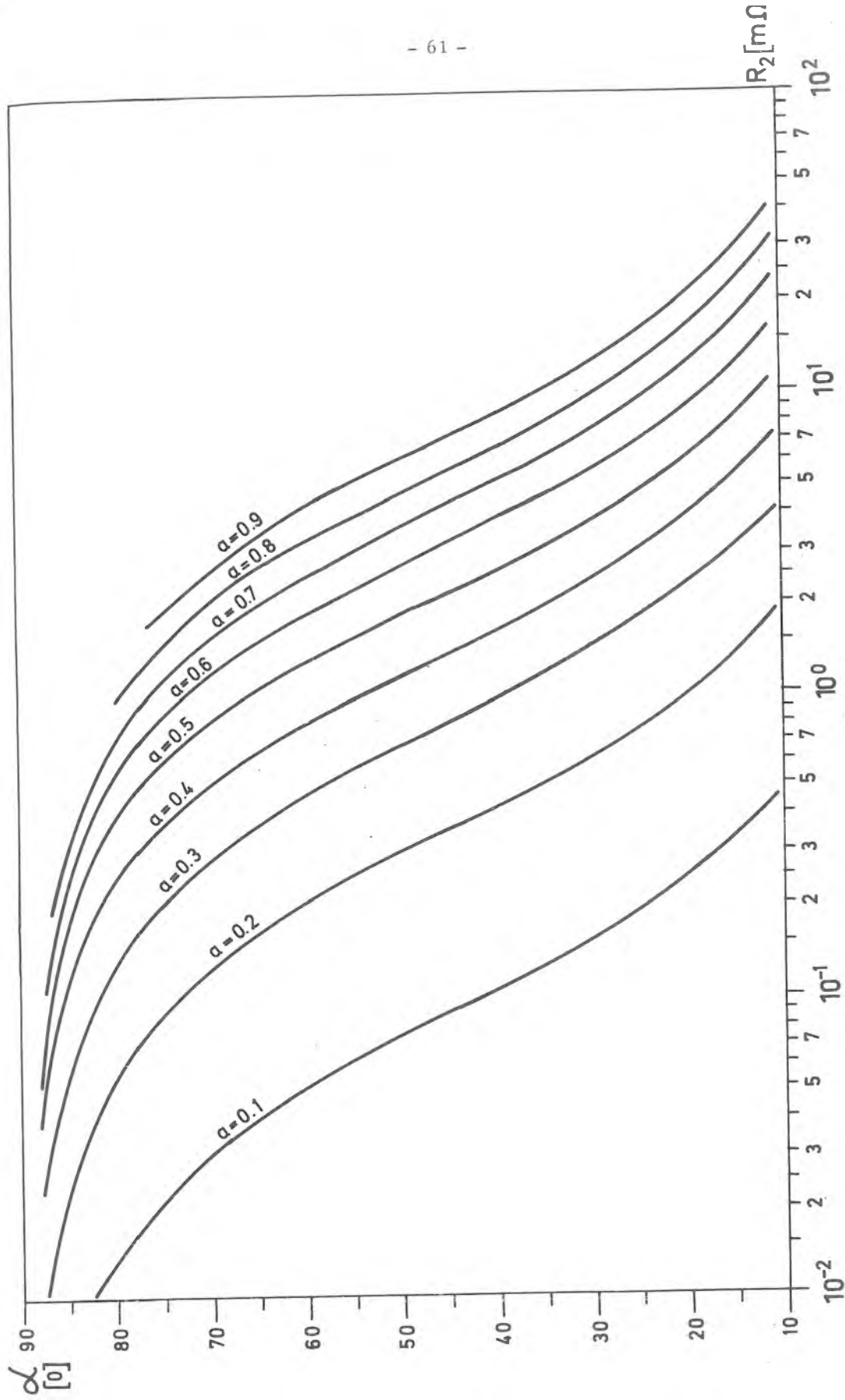


Fig. 4

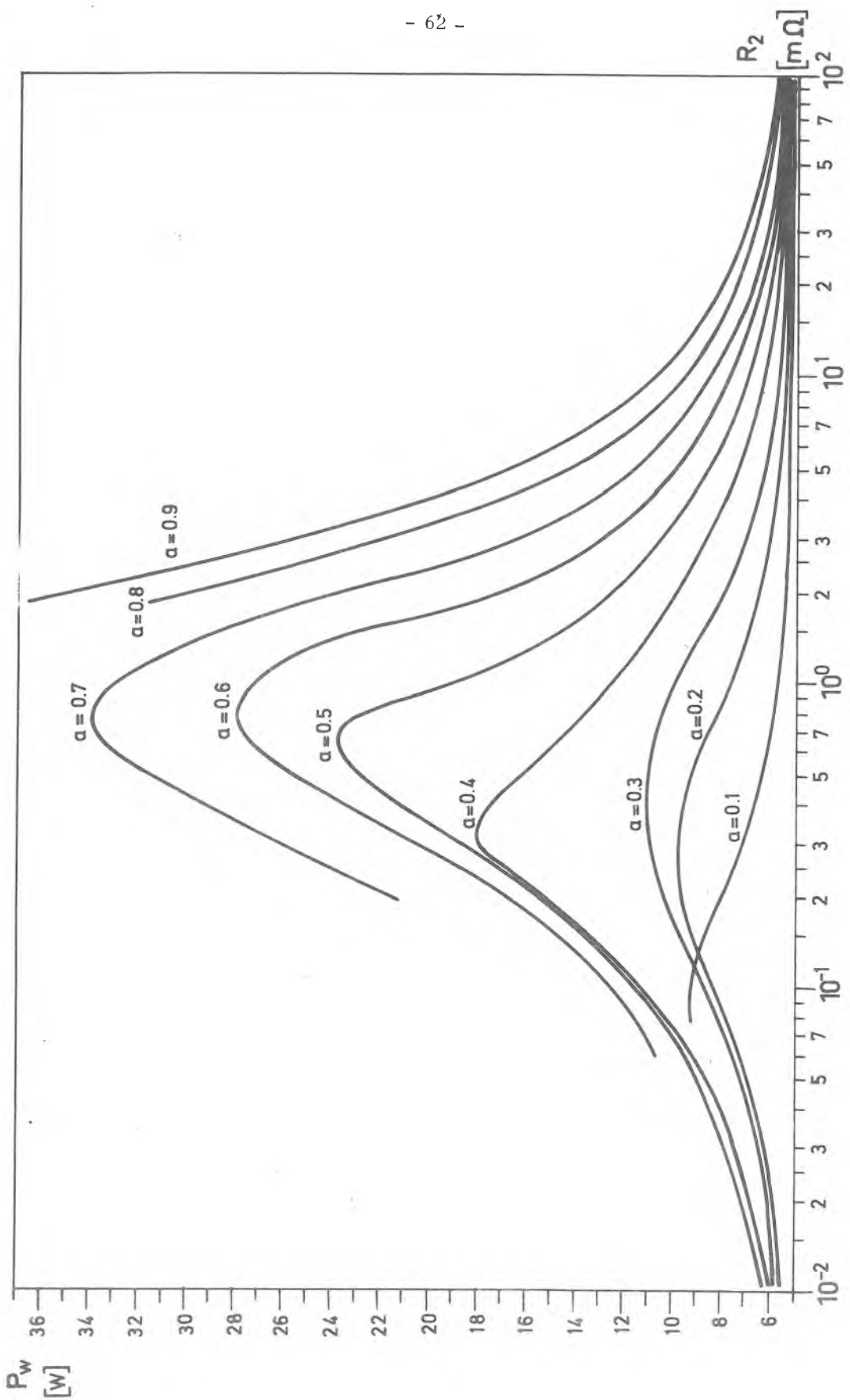


Fig. 5

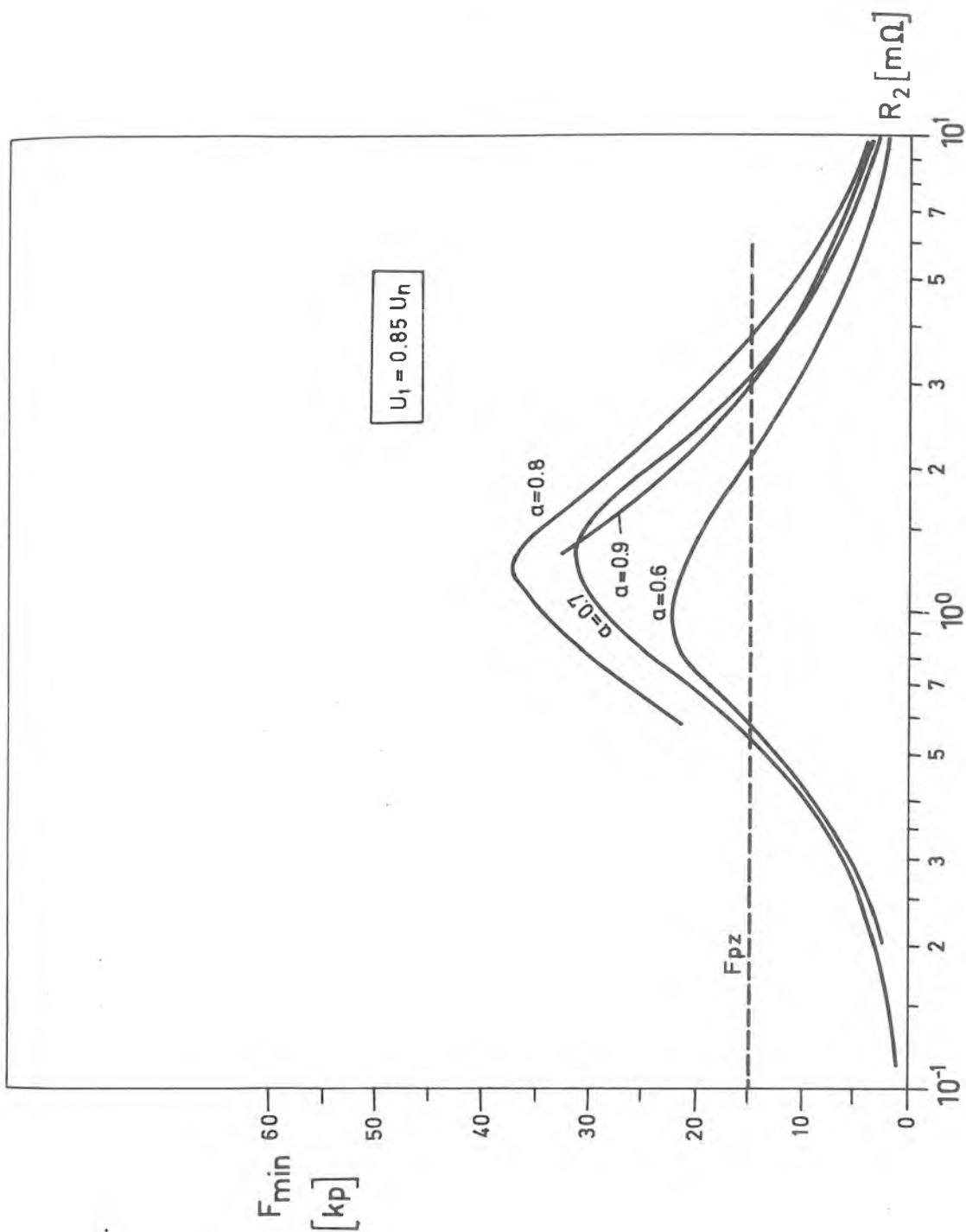


Fig.6

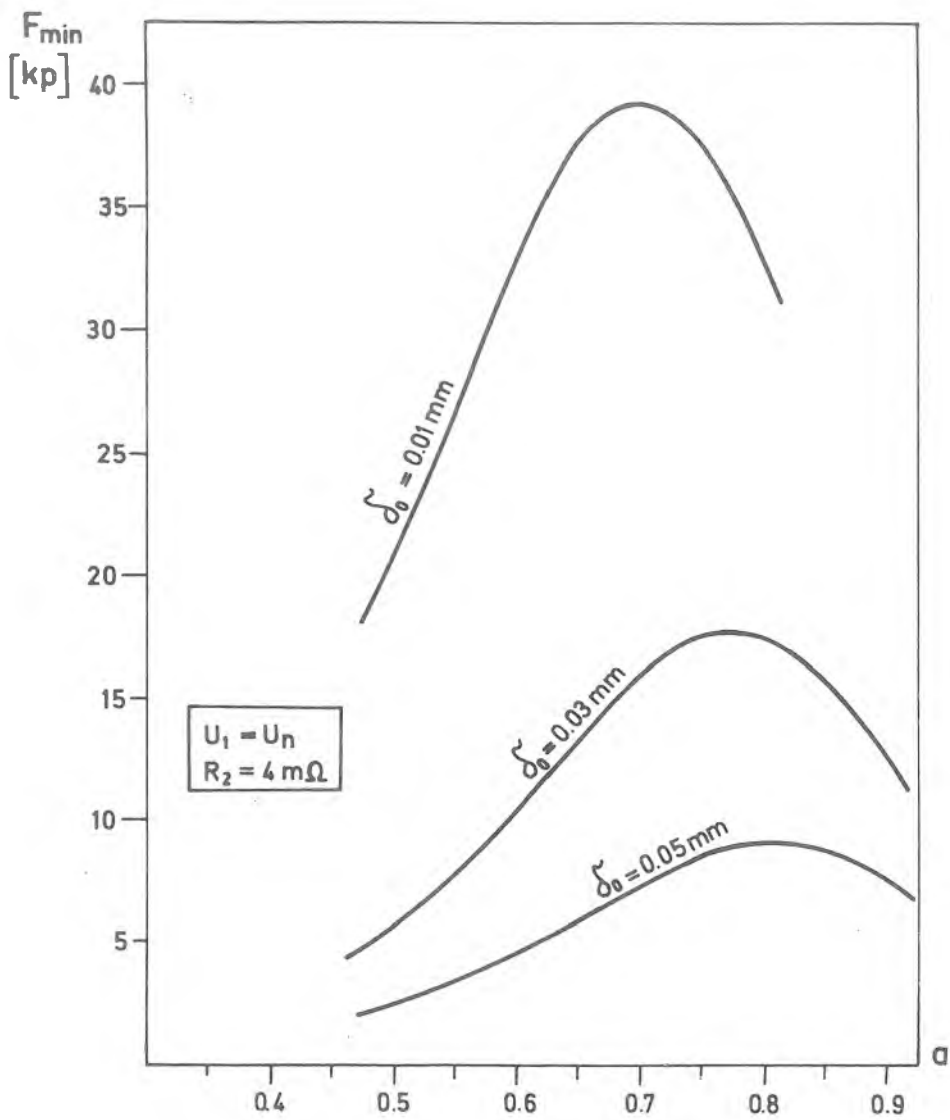


Fig. 7

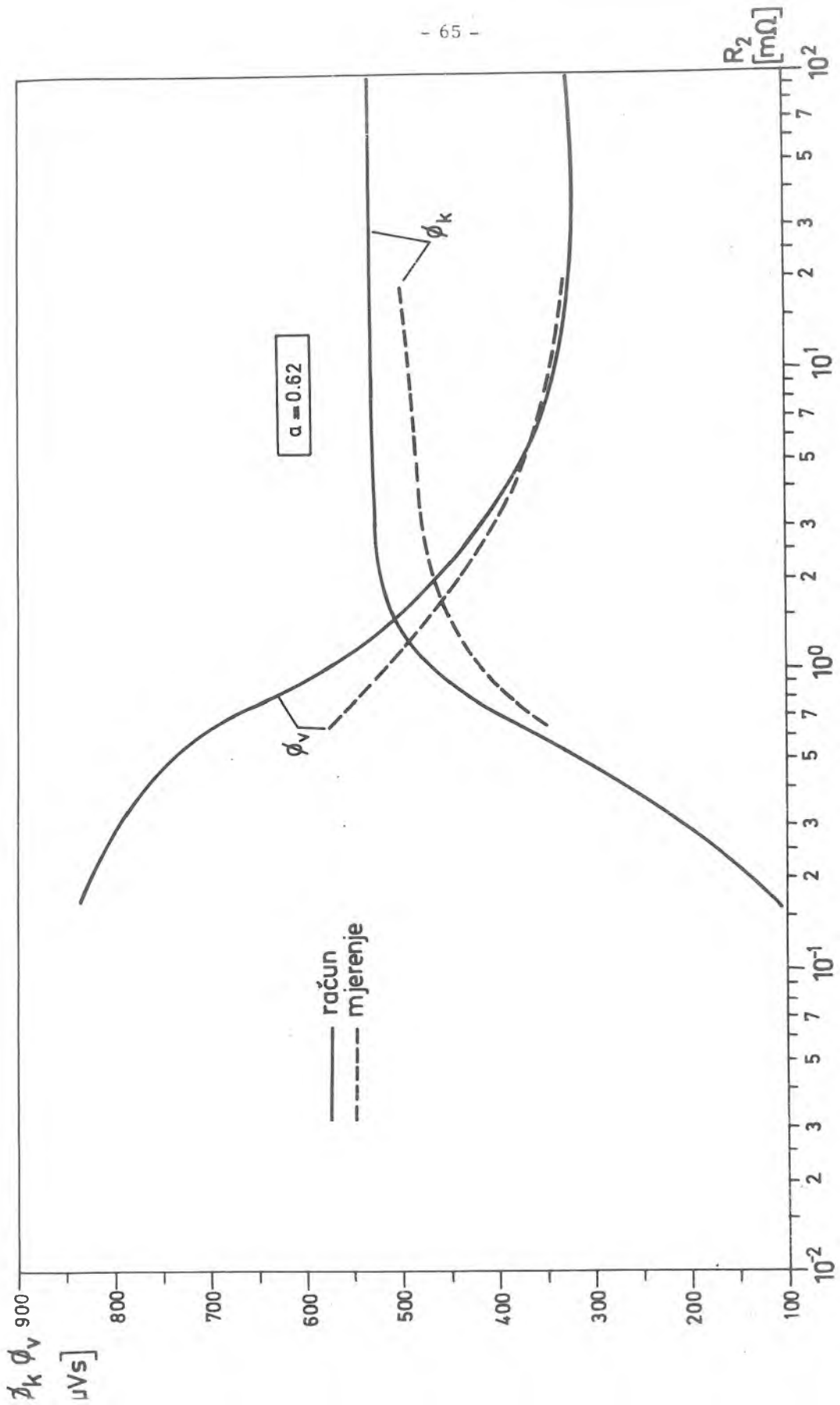


Fig. 8

Sead Krajinić, dipl.inž.
Istraživačko razvojni centar za
elektroenergetiku-Energoinvest-Sarajevo

STANJE I TENDENCIJE RAZVOJA SKLOPNIH APARATA

Kratak istorijski pregled razvoja sklopnih aparata, uloge medija za gašenje luka u prekidačima, savremeno stanje sklopne tehnike kao i trendovi daljeg razvoja iznijeti su u bitnijim i osnovnim crtama. Razmatrani su takođe neki posebni zahtjevi na sklopne aparate, uslovljeni razvojem prenosnog sistema i distributivne mreže kao i neki važniji problemi istraživanja i ispitivanja u razvoju sklopne tehnike.

THE STATE AND TRENDS OF SWITCHGEAR DESIGN DEVELOPMENT

A brief historical survey of switchgear design development is presented. The state of the art and future trends with special regard to the role of circuit-breaker arc-quenching medium are discussed. Some special requirements with regard to switchgear performances resulting from the development of transmission and distribution systems are also discussed, as well as problems and important aspects of research and testing in the development of switching equipment.

1. U v o d

Potreba za uređajem, koji uklapa i prekida strujne krugove, pojavila se od samog početka eksperimenata s električnim strujama. Pravi razvoj sklopnih aparata počinje, međutim, početkom masovnije upotrebe električne energije za javnu i industrijsku namjenu. Era, pak, šire praktične primjene električne energije počela je usvajanjem praktičnog sistema proizvodnje i prenosa električne energije naizmjeničnim strujama, koji je nerazdvojno vezan za ime našeg velikog zemljaka, Nikole Tesle uspomeni kojega je posvećen i ovaj simpozij.

Prve patente asinhronog motora i polifaznog sistema za prenos električne energije podnio je Tesla u New Yorku 12. oktobra 1887. godine, da bi sukcesivno u periodu do 1891. podnio još 40 patenata s ovog područja (1).

Prva električna centrala, snage 300 KS, u kojoj je primijenjen Teslin sistem trofaznih struja, izgrađena je 1891. god. u Lauffen-u s vodom napona 25 kV za prenos energije do Frankfurta, udaljenog 175 km (2). Gradnja prve veće elektrane, zasnovane na novom sistemu, počela je na Niagara Falls 1893. god. a prva tri agregata, ukupne snage 15000 KS, proradila su 1895. godine (1). Nakon ovog vremena počinje era brzog porasta proizvodnje i potrošnje električne energije.

Orijentacija na sistem naizmjeničnih struja za proizvodnju i prenos električne energije imala je dalekosežne posljedice i prednosti i u razvoju sklopnih aparata, iako su u vrijeme donošenja odluke druge prednosti naizmjeničnih struja bile odlučujuće. Naime, tek kasnije sagledane olakšice prekidanja naizmjenične struje nad istosmjernom, omogućile su skladan razvoj sklopne tehnike i praćenje rasta primjene električne energije u industrijskom razvoju naše civilizacije.

Kao i porast mnogih drugih veličina u razvoju ljudske civilizacije (porast svjetskog stanovništva, industrijske proizvodnje, ukupne potrošnje energije itd.) i porast potrošnje električne energije ima eksponencijalan karakter. Sa stanovišta razvoja sklopne tehnike interesantno je da su porast najvišeg primjenjenog napona za prenos električne energije pa čak i konvencionalna veličina, kao što je prekidna snaga (produkt struje kratkog spoja i povratnog napona nakon njenog prekidanja), pratili isti takav zakon eksponencijalnog rasta. Prema podacima (3,4) srednje godišnje stope rasta za svijet kao cjelinu od 1920. god. do danas iznose za porast proizvodnje električne energije 7,2%, maksimalne prekidne snage prekidača 10% i najvišeg prenosnog napona 3%, odnosno vrijeme udvostručenja iznosi 10, 7 i 23 godine respektivno. Relativno brži porast prekidne snage u odnosu na proizvodnju električne energije uglavnom je rezultat istovremenog stalnog porasta jedinične snage elektrana i zatvaranja petlji prenosnog sistema. Trenutno najviši napon prenosa je 765 kV uz prekidnu snagu oko 50 GVA. Ekstrapolacijom gore navedenih podataka o rastu kao i drugim ana-

lizama može se zaključiti da do konca stoljeća treba očekivati prenosne napone od 1500 kV i prekidne snage između 200 i 250 GVA (prekidna moć 80-100 kA). Već sad postoje u nekim zemljama razrađeni prekidači za naponski nivo 1050.... 11000 kV i prekidnu moć do 63 kA (3,5,6).

Zbog porasta jedinične snage generatora sličan trend porasta parametara imaju i tzv. generatorski prekidači koji se ugrađuju u blok - spoj generator - transformator. Već sad instalirani prekidači dostigli su nivo nazivne struje od 36 kA uz napon 18-24 kV i prekidnu snagu od 5,2 GVA (7). Daljnji porast potrebnih performansi ovih aparata smatra se neminovnim, i već sad proizvođači raspolažu prekidačima znatno superiornijih performansi (8).

Na distributivnim naponima 12, 24 i 36 kV, uglavnom zbog smišljenog planiranja mreže na takav način da se snaga kratkog spoja zadrži ispod unaprijed planirane granice, ne postoji trend jako brzog povećanja zahtjeva na osnovne performanse sklopnih aparata. Ogromnu većinu potreba na ovim naponima zadovoljavaju prekidači nazivne struje do 3000 A i prekidne moći 12,5 do 31,5 kA. Ipak, na tržištu postoje aparati nazivne struje do 4000 A i prekidne moći do 63 kA. Daljnji razvoj je uglavnom usmjeren ka smanjenju dimenzija i povećanju trajnosti i pouzdanosti rada.

Na niskom naponu 0,4 kV, iako se u samoj distributivnoj mreži normalno nalaze transformatori snage do 630 kVA, ne pojavljuju se prekidne moći iznad 22 kA, ipak zbog potreba industrije i drugih velikih potrošača, gdje nije rijetkost transformator od 2500 kVA ili čak dva transformatora u paralelnom radu po 1600 kVA (tj. sa strujom kratkog spoja 70-90 kA) gradnja aparata čak i za relativno male nazivne struje morala je pratiti ove trendove prekidnom moći. Danas se na tržištu već duže vremena mogu naći ne samo osigurači nego i prekidači nazivne struje čak ispod 100 A koji udovoljavaju gornjih zahtjevima. Daljnji spektakularan porast performansi ovih aparata ne treba očekivati u dogledno vrijeme. Razvoj je usmjeren ka smanjenju gabarita kompaktnom izvedbom i povećanju pouzdanosti.

Paralelno sa razvojem sklopnih aparata razvijala se i koncepcija gradnje sklopnih postrojenja sve do sadašnjeg stanja karakteriziranog sve većom integracijom postrojenja uvođenjem čvrste i gasne izolacije i pretfabrikovanjem pojedinih sklopova ili čitavog postrojenja u tvornici.

2. Kratak istorijski pregled razvoja

Gledajući istorijski razvoj vrlo je zanimljiva činjenica da je čitav razvoj tehnike gašenja električnog luka do danas, baziran na plodnosti nekoliko fundamentalnih ideja sagledanih u glavnim crtama još koncem prošlog stoljeća kao što su: magnetsko puhanje luka, rogovi lučnih kontakata, gašenje u ulju, gašenje u struji zraka (gasa), sistem više prekidnih mjesta, uvlačenje luka u cijevi iz organskog materijala te osigurači punjeni pijeskom (9). Danas, 75 godina kasnije, i pored pojave gasa SF_6 kao medija za gašenje luka i sistema za gašenje u vakuumu, nije došlo do fundamentalno novog gledanja na probleme prekidanja energetske strujnih krugova. Pojava poluprovodnika, iako je donijela potpuno nov princip prekidanja električne struje, na području prekidača za prenos i distribuciju električne energije nema većeg utjecaja i ograničeno je na upravljačke uređaje. Vjerovatno se ne može očekivati razvoj ekonomičnog i praktičnog prekidača za iole više napone i s prihvatljivim nivoom prekidne moći, baziranog na dosad poznatim poluprovodičkim elementima. Bez sumnje prekidači nove generacije biće prekidači s lukom, a ne prekidači s poluprovodnicima (9, 10).

U svim prekidačima s električnim lukom, otvaranjem kontakata formira se plazmeni most (električni luk), čije jezgro dostiže temperaturu do 30000°K . U slučaju naizmjenične struje, ova u svakom slučaju teče do prvog prirodnog prolaza kroz nulu. Ako nakon ovog trenutka intenzivnim hlađenjem i deionizacijom uspijemo, u području prvih mikro i milisekundi, preostale gasove i plazmu prevesti iz stanja dobrog vodiča u stanje dobrog izolatora, definitivno prekidanje strujnog kruga je osigurano. U ovom smislu svi prekidači su prekidači s gasom bez obzira da li je medijum prije dodira s vrućom plazmom bio u gasovitom, tečnom ili čak čvrstom agregatnom stanju.

Ipak, zbog velikih razlika u fizikalnim osobinama gasa, u kome se vrši gašenje luka kod prekidača s različitim medijima, analiza fizikalnih pojava zahtijeva različite prilaze, a rješenja samih komora za gašenje se radikalno razlikuju. Dok se npr. kod uljnih i malouljnih prekidača razlaganjem ulja u dodiru s plazmom formira atmosfera vodika tj. gasa s najlakšim postojećim molekuli-

lama, dotle se u prekidačima s gasom SF_6 radi o molekulama jednog od najtežih gasova, a kod vakuumskih prekidača čak o atmosferi sastavljenoj od metalnih para. Slična situacija je s pritiskom u komorama s različitim medijima, koji u komorama s uljem dostiže preko 100 kp/cm^2 pa do vakuumskih komora, u kojim ide do reda 10^{-9} kp/cm^2 . U komorama s drugim medijima pritisak leži između ova dva ekstrema. Ove razlike utječu na fizikalne osobine medija i pojave u toku prekidanja, kao što je dielektrična čvrstoća medija i posebno sposobnost hlađenja i deionizacije plazme nakon prolaza struje kroz nulu.

S istorijskog gledišta prvi prekidači visokog napona šire namjene bili su prekidači s mineralnim uljem kao medijem za gašenje luka. Uz određeno usavršavanje i djelomičnu primjenu nekih nezapaljivih medija (vode, ekspanzina) ovi prekidači bili su sve do 30-tih godina praktično jedini komercijalni prekidači visokog napona. Mineralno ulje, kao medij za gašenje luka, i pored svih nedostataka (opasnost od eksplozije i požara te gradacija kvaliteta ulja) zadržalo se u gradnji prekidača sve do danas, a njihov razvoj se nastavlja.

Prvi komercijalni prekidači s komprimiranim zrakom pojavili su se oko 1930.g. i njihov razvoj tekao je sve do danas, kad su posebno važno mjesto zauzeli kao prekidači za najviše napone i generatorski prekidači.

Iako su glavne prednosti nekih elektronegativnih gasova, a posebno sumporheksafluorida (SF_6) sagledane znatno ranije, tek 50-tih godina pojavili su se prvi praktični prekidači s gasom SF_6 kao medijem za gašenje luka, i njihov razvoj je u punom zamahu.

Slična situacija je s vakuumskim aparatima; prvi pokusi prekidanja struje u visokom vakuumu obavljani su 20-tih godina našeg vijeka, a tek 50-tih godina pojavili su se prvi komercijalni prekidači, namijenjeni široj primjeni.

U sadašnjem momentu, bar što se tiče visokog i srednje napona, nemoguće se prognozirati apsolutnu prevlast bilo koga od nabrojanih medija i sistema prekidanja, iako će u pojedinim domovima primjene svakako doći do određenih pomjeranja u korist jednog ili drugog medija.

Što se tiče niskog napona, prvi prekidači zasnivali su se na jednostavnom razvlačenju luka u zraku razdvajanjem kontakata. Zatim su uvođeni razni sistemi dovođenja luka u dodir sa stjenka-
ma od izolacionog materijala (keramike) radi efikasnijeg hlađenja i deionizacije, te je tako nastao čitav niz sistema komora s uskim procjepima i labirintima, izrađenim od raznih keramičkih i drugih izolacionih materijala otpornih na djelovanje električnog luka. Ovakvi sistemi prekidanja u čistom obliku zadržali su se do danas uglavnom u sistemima gašenja upravljačkih aparata (kontaktora) posebno za teške uslove rada i na prekidačima za istosmjernu struju.

Sistem gašenja u deion rešetki, koji je patentirao Dolivo Dobrowolsky 1910.g. našao je praktičnu primjenu u gradnji prekidača po prijedlogu Slepian-a tek 1928.g. da bi danas gotovo apsolutno dominirao u gradnji prekidača niskog napona.

Ova dva principa, tj. sistem uskih izolacionih procjepa i labirinta i deion rešetke uz magnetsko puhanje luka kombiniraju se na razne načine u gradnji komora za gašenje srednjenaponskih prekidača za naponske nivoe do 20 kV. Ovakvi prekidači čine veliki dio ugrađenih prekidača u distributivnim mrežama nekih zemalja kao npr. SAD i Japana.

U izvedbi sklopnih postrojenja visokog napona, današnja tendencija ka gradnji metalom oklopljenih postrojenja, počela je dosta davno, te se na naponima reda 12, 24 i 36 kV može smatrati kao koncepcija definitivno prihvaćena. Smanjenje dimenzija ovih postrojenja moguće je uvođenjem dodatne izolacije sabirnica i komponenata, za što je, uz izuzetke nekih proizvođača koji upotrebljavaju ulje kao izolaciju, uglavnom usvojena čvrsta izolacija. Mnoge prednosti metalom oklopljenih postrojenja, kao npr. sigurnost od dodira, mogućnost sprečavanja širenja otvorenog luka, brza zamjenljivost pojedinih elemenata bez prekidanja pogona itd. pogodovali su općenitom prihvatanju ovakve koncepcije gradnje.

Na višim naponima, iako su se prva punoizolovana i metalom oklopljena postrojenja pojavila još 30-tih godina, (u Britaniji za napon 66 kV s uljem kao izolacijom i medijem za gašenje luka u prekidaču, u Holandiji 1948. za napon 110 kV takođe s uljem kao izolacijom i medijem za gašenje, da bi se do 1960.g. prešlo na komprimirani zrak za obje svrhe (4)/, ipak tek razvojem pri-

mjene gasa SF_6 kao izolacionog medija i medija za gašenje luka, 60-tih godina pojavio se niz proizvođača punoizolovanih metalom oklopljenih postrojenja za napone 123 i 245 kV. Danas već postoje u proizvodnji punoizolovana postrojenja s gasom SF_6 za naponske nivoe 420, 525 i 765 kV a u razradi su postrojenja do 1100 kV. Jedno ovakvo postrojenje za napon 765 kV nalazi se već u eksploataciji u SAD. Većina stručnjaka se slaže da će u buduću biti instalirano sve više metalom oklopljenih postrojenja s gasom SF_6 (11, 12).

3. Sistemi prekidanja i stanje razvoja prekidača

Prekidači moraju u mreži ispuniti čitav niz funkcija. U prvom redu ovaj aparat mora omogućiti vođenje, prekidanje i uklapanje pogonskih struja, koje se kreću od nekoliko ampera do nekoliko hiljada ampera uz pogonske napone do nekoliko stotina kilovolti. U slučaju kvara, kao organ zaštite mreže i postrojenja, prekidač mora razorno djelovanje struje kratkog spoja svesti na minimum tj. što brže odvojiti kvar od ostalog dijela mreže.

Kao što je već rečeno, najveće struje kratkog spoja pojavljuju se na generatorskim sabirnicama velikih elektrana i dostižu vrijednosti blizu 200 kA uz pogonske napone između 20 i 30 kV. Ipak, najteži uslovi, koje nameću savremeni energetske sistemi, pojavljuju se na visokonaponskoj strani, gdje u slučaju tzv. bliskog kratkog spoja, kod koga nakon prolaska struje kroz nulu, početna brzina porasta prelaznog povratnog napona dostiže mnogo kilovolti svake mikrosekunde, i prekidaču nameće najveće zahtjeve u pogledu elektrofizikalnih naprezanja (4).

Specifičnosti ponašanja i funkcionisanja prekidača u različitim uslovima rada koje nameće sistem, određeni su u prvom redu medijumom i načinom gašenja električnog luka.

3.1. Prekidači s gašenjem u ulju

U prekidaču s mineralnim uljem električni luk razlaže ulje tako da se gašenje faktički obavlja u atmosferi vodika. Efikasnom gašenju ide na ruku u prvom redu dobra toplotna vodljivost vodika kao i relativno velika brzina difuzije lakih atoma i molekula vodika. Teškoće nastaju zbog relativno niske dielektrične čvrstoće

vodika, što se kompenzira visokim radnim pritiskom, koji isparavanjem i dekompozicijom ulja nastaje u komori za vrijeme gorenja luka. Zbog ovoga, ovi prekidači imaju radne pritiske, koji dostižu vrijednosti 100 kp/cm^2 i viši su nego kod svih drugih sistema gašenja luka. Ovo nameće određene teškoće u konstrukciji i izboru materijala i čini prekidač unekoliko nesigurnim u pogledu moguće eksplozije i požara. S druge strane, zbog navedenih osobina vodika, kod prekidanja malih struja kod kojih ne dolazi do dovoljnog porasta pritiska, nastaju teškoće prekidanja koje moraju biti kompenzirane dodatnim ubrizgavanjem ulja u zonu luka i drugim konstruktivnim mjerama.

Kako se vidi, postoji neka gornja granica prekidne moći i pogonskog napona za ove prekidače, jer bi savladavanje potrebnih pritisaka zahtijevalo takvo dimenzioniranje komora koje ne bi moglo ni ekonomski biti opravdano.

Osobine ulja, kao medija za gašenje luka, dovele su do, unekoliko, paradoksalne situacije, dok su npr. na srednjim naponima malouljni prekidači u Evropi praktično bez konkurencije, u USA i Japanu ih odbacuju kao suviše nesigurne zbog mogućnosti požara i eksplozije. S druge strane, punouljni prekidači, koji su iz istih razloga sigurnosti u Evropi odbačeni, na svim naponskim nivoima u SAD, Japanu, SSSR-u i V. Britaniji i danas sačinjavaju daleko najveći dio instaliranih prekidača visokog napona na 110 i 220 kV. U SSSR-u npr. 85% proizvodnje 110 kV-nih prekidača i 65% 220 kV-nih prekidača čine punouljni prekidači (5). Ipak i u ovim zemljama postoji trend ka napuštanju punouljnih prekidača, posebno pojavom napona 420 kV i više (5,9). Ne može se, međutim, sagledati opadanje interesa za razvoj malouljnih prekidača, posebno u Evropi i SSSR-u. Na srednjem naponu 6-36 kV u Evropi su ovi prekidači praktično bez konkurencije za opću namjenu u distribuciji i teško se zbog ekonomskih razloga može očekivati da će u doglednoj budućnosti naći adekvatnu zamjenu, pogotovo što su u pogledu pouzdanosti i performansi dostigli veoma visok stepen. Na evropskom tržištu mogu se normalno naći ovi prekidači napona 12-36 kV s nazivnom strujom od 4000 A i prekidnom moći 50 kA, a postoje izvedbe i do 63 kA.

Na visokom naponu 123 do 550 kV na evropskom tržištu ovi prekidači se rade za nominalne struje do 3150 A uz prekidnu moć

31,5 do 63 kA, odnosno s prekidnom snagom do 50 GVA. Ovi prekidači dobro odolijevaju strmom početnom porastu prelaznog povratnog napona, kao i povratnim paljenjima kod prekidanja neopterećenih vodova, zahvaljujući dodatnom ubrizgavanju ulja i drugim konstruktivnim mjerama, i u tom pogledu su manje osjetljivi od drugih prekidača, ali do izvjesne mjere odsjecaju male induktivne struje te ponekad moraju biti preduzete posebne mjere za sprečavanje prenapona.

Iako postoje izvedeni malouljni prekidači za 750 kV i čak 1050 kV (13, 14) zbog potrebe smanjenja ukupnog vremena prekidanja na višim naponima (malouljni prekidači mahom su 3-periodni i smanjenje vremena je teže nego kod nekih drugih sistema npr. kod prekidača s komprimiranim zrakom) kao i drugih razloga, u ovom trenutku se čini da će neke druge tehnike zadržati već sad postojeće prednosti na naponima iznad 420 kV.

3.2. Prekidači s komprimiranim zrakom

Kao što je ranije spomenuto, prekidači s komprimiranim zrakom pojavili su se u Evropi oko 1930.g. i njihov razvoj je do danas bio praćen porastom radnog pritiska. Zbog više dielektrične čvrstoće zraka u odnosu na vodik, radni pritisci su općenito niži nego kod malouljnih, a kod savremenih prekidača dostižu vrijednosti reda 50 kp/cm². Bez obzira na dostupnost atmosferskog zraka, njegovo sušenje, komprimiranje i uskladištenje zahtijeva dosta složene pomoćne uređaje, te se u eksploataciji preferira ugradnja više prekidača zajedno radi troškova instalacije komprimiranog zraka. Dalji porast prekidne moći može se postići povećanjem efikasnosti mlaznice i povišenjem radnog pritiska. Ipak se smatra da povećanje radnog pritiska iznad 70 kp/cm², sa stanovišta sigurnosti i problema savladavanja zvučnih efekata, nije poželjno, te se time unekoliko postavlja i granica razvoja ovih prekidača (15).

Zbog sastava zraka može se smatrati da gašenje luka nastaje u atmosferi dušika. Klasična termička vodljivost teških molekula zraka je niža od one za vodik i kompenzira se višom energijom disocijacije molekula dušika. Naime, energija disocijacije molekula dušika ($N_2 + \text{toplina} = 2N$) iznosi 9,7 eV, što je znatno više u odnosu na vodik, za koji ova energija iznosi 4,4 eV. Disocijacija se odvija u vrućem stablu luka, a atomi dušika prenose

ovu energiju disocijacije zajedno sa svojom kinetičkom energijom u vanjske hladnije zone luka, gdje se rekombinacijom molekula ova energija odaje u obliku topline. Ovim se, u temperaturnom području oko 7000°K , za čitav red veličine povećava klasična termička vodljivost, što smanjuje vremensku konstantu luka i naravno povećava sposobnost gašenja (10).

Van Evrope interes za prekidače s komprimiranim zrakom pojavio se dvadesetak godina kasnije pojavom prenosnih napona iznad 220 kV. Na naponskim nivoima iznad 420 kV do sada najviše uspjeha imaju upravo ovi prekidači. Već sada postoje razrađeni prekidači za napone do 1100 kV i prekidnu moć 63 kA (6, 16), dok na nižim naponima prekidna moć ide do 80 kA. U pogledu zahtjeva za sve kraćim ukupnim vremenom prekidanja, prekidači s komprimiranim zrakom imaju izvjesne prednosti, jer za gašenje, uglavnom, već mora biti na raspolaganju zrak vrlo visokog pritiska koji onda omogućava brže otvaranje nego mehanički sistemi pogona, ugrađeni u druge vrste prekidača. Tako je danas sasvim normalna stvar da ukupno vrijeme prekidanja ovih prekidača bude 2 perioda, odnosno 40 ms (16).

Drugo veoma važno područje, u kome za sada imaju prvenstvo prekidači s komprimiranim zrakom, su generatorski prekidači. Danas već postoje razrađeni prekidači za napon 30 kV, nazivnu struju 40.000 A i prekidnu moć 250 kA /13 GVA/ (8).

3.3. Prekidači s gasom SF_6

Ispitivanja dinamičkih karakteristika električnog luka u gasu SF_6 (17, 18) pokazala su da ovaj medij pri malim strujama oko 1 A ima veoma nisku vremensku konstantu luka oko 1 μs tj. za oko 2 reda veličine nižu nego za zrak. Usprkos tome izuzetna sposobnost gašenja luka u ovom gasu ne može biti pripisana isključivo maloj vremenskoj konstanti, jer uz takvu pretpostavku ostaje bez odgovora pitanje zašto u nekim drugim gasovima, kao npr. H_2 , CO_2 , O_2 , He , koji takođe imaju vrlo malu vremensku konstantu, gašenje luka nije tako uspješno ili je čak vrlo loše.

Daljnja istraživanja (19-22) omogućila su da se na slijedeći način sumira razumijevanje mehanizma gašenja luka u gasu SF_6 (10, 23).

Ukupna energija veze šest atoma fluora s centralnim atomom sumpora iznosi 22,4 eV, što je znatno više nego kod dvoatomnog dušika (9,7 eV). Disocijacija molekula SF_6 ne odvija se u jednom mahu nego se može odvijati u šest odvojenih koraka, pri čemu je energija parcijalne disocijacije niža, a proces je najintenzivniji kod energije oko 6,6 eV ili oko 2000°K , što je znatno niže nego za dušik, gdje energiji 9,7 eV odgovara oko 7000°K .

U jezgri luka, gdje vladaju visoke temperature, plazma se sastoji od atoma sumpora i fluora s neznatnim sadržajem dvoatomnih molekula. Ovi atomi difundiraju u područja nižih temperatura, gdje se rekombiniraju i odaju toplinu utrošenu na disocijaciju. Električna vodljivost jezgre luka istovremeno je vrlo visoka zbog relativno niske energije ionizacije elementarnog sumpora (S_2 , S), koja iznosi 10,4 eV. Zahvaljujući ovome napon gorenja luka u gasu SF_6 je relativno nizak u odnosu na druge medije. Toplotna vodljivost, koja je visoka u području visokih temperatura, opada prema nižim temperaturama i ima minimum oko 4000°K da bi opet porasla i primila ponovno visoke vrijednosti na oko 2000°K . Električna vodljivost, zbog visoke energije ionizacije fluora i njegovih spojeva (F , F_2 , SF_2 , SF_4 , S_2F_{10}) kao i samog gasa SF_6 , počinje naglo opadati od 7000°K naniže i oko 2000°K , kad je gotovo sav elementarni sumpor rekombiniran, već je sasvim neznatna.

Iz gore izloženog slijede značajne dinamičke osobine luka u gasu SF_6 . Temperaturni profil luka karakteriziran je izrazito ograničenom jezgrom relativno malog promjera i visoke električne vodljivosti. Promjer jezgre se smanjuje približavanjem struje nuli, ali se održava sve do struja veoma blizu nulte vrijednosti. Prema tome, luk u gasu SF_6 nema sklonosti skokovitom gašenju prije prirodne nule struje, tj. nema sklonosti stvaranju prenapona, npr. kod prekidanja malih induktivnih struja. Nakon prolaza struje kroz nulu, uslijed maksimuma toplotne vodljivosti kod 2000°K , preostala plazma se naglo hladi. Istovremeno produkti raspada gasa, koji sadrže fluor, su elektronegativni, zahvataju slobodne elektrane, čija se kritična koncentracija za gašenje od 10^9 elektrana po cm^3 dostiže kod oko 2500°K . Dalja deionizacija teče vrlo brzo, tako da već kod 1000°K medij ima znatnu dielektričnu čvrstoću. Vremenska konstanta luka, hlađenog strujom gasa zvučne brzine, dostiže kod približavanja struje nuli, ekstremno nisku vrijednost reda 10^{-3} ps,

što čini prekidače s gasom SF_6 manje osjetljivim na strm početni porast transientnog povratnog napona (bliski kratki spoj) od npr. prekidača s komprimiranim zrakom.

Zahvaljujući opisanim termičkim, deionizacionim i dielektričkim osobinama gasa SF_6 kao medija za gašenje električnog luka moguće je prekidače s gasom SF_6 graditi sa znatno nižim radnim pritiscima nego s komprimiranim zrakom, a pogotovo s uljem. Razlika pritiska za stvaranje potrebne struje gasa takođe je niža nego za zrak, što sve skupa omogućava gradnju ovih prekidača i za visoki napon kao potisnih (puffer) što je za zrak npr. moguće samo za niže napone i za prekidanje pogonskih struja. Pritisak gasa u ovim prekidačima kreće se od 4-6 kp/cm². Zahvaljujući visokoj dielektričnoj čvrstoći gasa SF_6 napon po prekidnom mjestu doveden je do 170 kV (24), tako da se grade prekidači za 240 i 300 kV sa dva, za 420 i 500 kV sa četiri, a za 765 kV sa šest prekidnih mjesta uz prekidnu moć 31,5 do 50 kA.

Uz pogodnu sinhronizaciju momenta početka razdvajanja kontakata i početka otpuhivanja luka postignuto je da vrijeme trajanja luka ne prelazi 1,1 periodu (22 ms), i uz specijalnu izvedbu pogona konstruiran potisni prekidač, čije je ukupno vrijeme prekidanja ispod 40 ms. Na ovom principu izvedeni su dvoperiodni prekidači za 245 i 300 kV s dva prekidna elementa prekidne moći 50 kA i nazivne struje do 8000 A (25). Ipak, potrebna energija pogona potisnih SF_6 prekidača, zbog potrebe potiskivanja gasa, znatno je veća od one za malouljne prekidače. Ovo je navelo neke konstruktore (26, 27) na pokušaj upotrebe elektromagnetskih sila, proizvedenih u serijskim namotajima kroz koje teče struja prekidanja, kao dodatne sile za potiskivanje gasa. Autori (27), koji su izradili prototip za 168 kV, postigli su značajne rezultate (40 kA kod bliskog kratkog spoja uz početnu strminu prelaznog povratnog napona 9,2 kV/ μ s i 50 kA kod sabirničkog kratkog spoja), izražavaju uvjerenje da se potrebna potisna sila pogona može reducirati ovim putem čak na polovinu. Ipak, kompliciranost prekidnog elementa, koja nastaje ugradnjom serijskih namotaja i pomoćnih kontakata, je uzrok da ekonomičnost i pouzdanost ovakve izvedbe, u odnosu na klasični potisni prekidač, može doći u pitanje.

Gledajući čisto električne performanse prekidača, ove se lakše postižu prekidačima s gasom SF_6 s dva pritiska. Kod ovih

prekidača za izolaciju služi gas pod pritiskom $2-3 \text{ kp/cm}^2$, a za stvaranje struje gasa za gašenje luka posebni gasni sistem pod pritiskom $14-19 \text{ kp/cm}^2$. Na ovaj način postižu se relativno lako vremena gorenja luka $\leq 20 \text{ ms}$ i konstrukcija prekidača s ukupnim vremenom prekidanja $\leq 40 \text{ ms}$ (28, 29).

Gasni sistem visokog pritiska, koji zahtijeva poseban kompresorski uređaj i potreba grijanja medija zbog održavanja u gasovitom stanju, čine ove prekidače, relativno, skupim. U pogledu sigurnosti rada potencijalna opasnost od havarije je veća kod prekidača s dva pritiska, kod kojih uslijed kondenzacije vlage u sistemu visokog pritiska može doći do proboja izolacije (30, 31).

Na srednjim naponima 12, 24 i 36 kV pojavio se izvjestan broj proizvođača na tržištu s potisnim SF_6 prekidačima prekidne moći 8-20 kA. U kojoj mjeri će ovi prekidači, zbog potrebe za relativno jačim pogonom, moći konkurisati malouljnim prekidačima u Evropi, za sada nije moguće tačnije procijeniti.

I pored niza istraživalačkih radova (32-34) na mogućnostima gašenja luka magnetskom rotacijom u mirnom gasu SF_6 , čini se da se ne mogu očekivati spektakularni rezultati u praktičnoj primjeni ovog sistema gašenja, i ona će vjerovatno u budućnosti biti ograničena na niže napone.

U patentnoj literaturi mogu se naći projekti aparata kod kojih bi kao medij za gašenje luka služio tekući gas SF_6 . Zamisao se sastoji u tom da se tekući gas SF_6 zatvori u posudu pod pritiskom, a proces gašenja bi tekao slično kao u malouljnim prekidačima. Za ovu svrhu neophodan je početni pritisak od oko 20 kp/cm^2 da bi se gas pri normalnim temperaturama održavao u tekućem stanju. Konkretniji rezultati nastojanja na praktičnoj primjeni ovog principa nisu poznati autoru.

3.4. Vakuumski prekidači

Kontaktни sistem vakuumskog prekidača nalazi se u zaptivnoj posudi, evakuiranoj do visokog vakuuma reda 10^{-9} kp/cm^2 . Električni luk gori u metalnim parama koje nastaju isparavanjem materijala kontakata (pretežno katode) i čiji se pritisak u komori može u toku gorenja luka približiti atmosferskom. U toku približavanja i nakon prolaza struje kroz nulu, metalne pare se naglo kondenzi-

raju, čime se naglo povećava dielektrična čvrstoća međukontaktnog prostora, što dovodi do definitivnog gašenja luka. Da bi se pospješila kondenzacija metalnih para, oko kontaktnog sistema postavlja se metalni ekran, koji ujedno štiti stijenke posude od taloženja kondenziranog metala, što bi moglo dovoditi do proboja. Kako se vidi, sam princip prekidanja u vakuumu je veoma jednostavan. Teškoće su nastale zbog oslobađanja gasova iz stijenki posude i kontakata nakon evakuacije, što je dovelo do pojave da je već nakon kratkog vremena rada početni visoki vakuum bio pokvaren, a probojni napon naglo opao. U pogledu sposobnosti prekidanja postoji opasnost, kod prekidanja malih struja, da luk ne oslobodi dovoljnu količinu metalnih para sa katode, te da dođe do odsjecanja struje prije prirodnog prolaza kroz nulu, uslijed čega, ako se radi o induktivnom krugu, mogu nastati neželjeno visoki prenaponi. Iz istog razloga nastaje i druga pojava, ako otvaranje kontakata započne neposredno nakon prolaza struje kroz nulu, kad dolazi do uzastopnog paljenja i gašenja luka, koje se ponavlja vrlo brzo, i dovodi takođe do prenapona i dodatnog degradiranja izolacije postrojenja (35, 36). S druge strane, kod vrlo visokih vrijednosti struje, oslobađa se tolika količina metalnih para da nakon prolaza struje kroz nulu, nije moguća njihova dovoljno brza kondenzacija, što dovodi do neuspjelih prekidanja. Povrh toga neravnine na elektrodama, nastale erozijom električnim lukom, izazivaju opadanja početne probojne čvrstoće kontaktnog razmaka u vakuumu. Kako se vidi, kontaktnom materijalu se nameću vrlo teški i oprečni zahtjevi, te je od prvorazrednog značaja pažljiv izbor materijala kontakata i komplicirana tehnologija njihove izrade.

Danas u SAD, Japanu i V.Britaniji ima desetak proizvođača vakuumskih komora i jedan u Evropi. Proizvode se komore od 3,3 do 34,5 kV uz prekidnu moć 8 do 26 kA. Na tržištu ovih zemalja postoje prekidači za napone 5 do 38 kV, uz gore navedenu prekidnu moć.

Zbog relativno visoke cijene u odnosu na malouljne prekidače srednjeg napona, bar u Evropi se ne može očekivati u dogledno vrijeme masovnija upotreba vakuumskih prekidača, izuzev u specijalnim slučajevima gdje se traži izuzetna pouzdanost, trajnost funkcionisanja bez održavanja i sigurnost od požara i eksplozije.

Prošle godine se u SAD pojavila komercijalna vakuumska komora za napon 45 kV i prekidne moći 40 kA (37). S ovom komorom su izvedena ispitivanja prekidne moći modela s četiri prekidna elementa na naponu 175 kV i prekidne moći do 40 kA. Autori iznose planove za građnju prekidača za napone 145, 242, 362, 550 i 800 kV, nazivne struje do 3000 A i prekidne moći 40 kA na bazi gore spomenute vakuumske komore. Zbog još uvijek relativno velikog broja prekidnih elemenata po polu (za 550 kV 11 a za 800 kV 14 komora), što znatno usložnjava mehanički dio aparata i sinhronizaciju hoda kontakata pojedinih prekidnih elemenata, teško je ocijeniti koliko će ovaj budući niz aparata biti po pouzdanosti uporedljiv s već razvijenim prekidačima visokog napona drugih principa gašenja luka.

Znatno više uspjeha su do sada imali vakuumski kontaktori za upravljanje motorima 3 i 6 kV, jer imaju izuzetno visoku mehaničku i električnu trajnost. Ipak i na ovom području postoje problemi zbog spomenute sklonosti stvaranja prenapona.

3.5. Ostali principi prekidanja

- Zračni prekidači (s magnetskim puhanjem luka i komorama s izolacionim procjepima i kombinacijom, deion principa), kao što je spomenuto, u SAD i Japanu čine značajan dio distributivnih prekidača za napone do 15 kV, nazivne struje do 3000 A, a prekidna moć im se kreće do vrijednosti reda 40 kA. U Evropi takođe postoje proizvođači ovih prekidača za napone 12 i 24 kV, ali se primjenjuju više za posebnu namjenu, kao što su teški industrijski pogoni, pomoćni pogoni termoelektrana, lučne peći i slično. Karakteristika ovih prekidača je velika sigurnost rada, velika mehanička i električna trajnost. Usprkos napretku, postignutom posljednjih godina u smanjenju težine i dimenzija, cijena ovih aparata je znatno viša od odgovarajućih maloukljnih, te za opću upotrebu u distribuciji njihov prodor u Evropi ne dolazi u obzir.
- Sklopke srednjeg napona se u Evropi uglavnom izводе sa sistemom gašenja čvrstim gasom ili autopneumatskim otpuhivanjem luka. Rade se za prekidanje nazivnih struja do 1250 A i napone 12 i 24 kV, a prilagođene su za rad u mreži sa snagom kratkog spoja 500 i 1000 MVA respektivno. Razvojni trend je karakteriziran

smanjenjem gabarita, u čemu je posljednjih godina ostvaren viđan napredak.

- Na niskom naponu za prekidače dominira deion princip gašenja luka, a izvode se za nazivne struje do 6000 A i prekidnu moć do 100 kA. Razvoj ovih prekidača kretao se posljednjih godina u dva pravca. S jedne strane razvijali su se tzv. limiteri, koji uvođenjem veoma brzih mehanizama i okidačkih sistema te komora za gašenje s visokim naponom gorenja luka, ograničavaju struju kratkog spoja i dovode do gašenja prije prirodnog prolaza struje kroz nulu. Ovim se ograničava naprezanje opreme iza prekidača strujom kratkog spoja. S druge strane razvijali su se tzv. selektivni prekidači, čija je glavna karakteristika upravo zadržavanje isklopa u kratkom spoju, što se postiže uz pojačanje cijelog sistema u pogledu termičkih i elektrodinamičkih naprezanja u kratkom spoju te kontaktnog sistema otpornog na zavarivanje. Cilj ovakve izvedbe je omogućavanje selektivnog stepenovanja zaštite, a vremensko zatezanje isklopa se kreće u granicama do 300 ms. Karakteristika razvoja niskonaponskih prekidača je takođe smanjenje dimenzija, zatvaranje cijelog prekidača u izolaciono kućište te uvođenje poluprovodničkih okidačkih sistema.

4. Razvoj mreže i neki zahtjevi na sklopne aparate

Kako je već spomenuto, na srednjem naponu mreža se razvijala tako da se smišljenim planiranjem ograniči rast struje kratkog spoja. Na visokom naponu, zbog stalnog rasta jedinične snage elektra na i visine prenosnog napona, ovo nije bilo moguće tako da i nadalje postoji trend porasta zahtjeva na performanse prekidača i ostalih sklopnih aparata. Ovdje ćemo ukratko razmotriti neke važnije aspekte problema u gradnji sklopnih aparata koje nameće moderna prenosna i distributivna mreža.

5. Porast prenosnih napona i posljedice

5.1.1. Prenaponi, dimenzioniranje izolacije i izvedba prekidača

Kako je ranije rečeno, u svijetu se već planiraju prenosni sistemi nazivnog napona reda 1000 kV, a do konca stoljeća mogu se očekivati naponi do 1500 kV. Postoje međutim, ograničenja porasta

prenosnog napona s aspekta osiguranja adekvatne izolacije kako linija prenosa tako i sklopnih aparata naročito u uslovima atmosferske zagađenosti. Potrebna dužina klizne staze izolatora raste, naime, brže nego linearno s povećanjem napona, a podnosivi komutacioni udarni prenapon sporije nego linearno s povećanjem klizne staze. Gornja granica podnosivog komutacionog prenapona, koja je određena izolatorima, izgleda da ne može mnogo preći vrijednost od 1600 kV bez obzira na dužinu izolatora (9). Ovo postavlja imperativan zahtjev da faktor komutacionog prenapona ne pređe za naponski nivo 750 kV vrijednost 2, za 1100 kV vrijednost 1,7 i za 1500 kV vrijednost 1,5. Ovo istovremeno zahtijeva konstrukciju prekidača za najviše napone, koji gotovo uopće ne bi proizvodili komutacione prenapone, odnosno vrlo obimnu primjenu sredstava za njihovo ograničenje (3, 9, 38).

Glavni izvori komutacionih prenapona mogu biti slijedeći manevri u mreži: prekidanje struje transformatora u praznom hodu, prekidanje i uklapanje prigušnica visokog napona te prekidanje i uklapanje vodova u praznom hodu. Svi nabrojani prenaponi, osim posljednjeg, mogu biti otklonjeni, kao i atmosferski, klasičnim načinom pomoću odvodnika prenapona. Prenaponi, međutim, koji nastaju uklopom dugih vodova u praznom hodu uz pogonski napon iznad 420 kV, padaju u takvo frekventno područje u kome kod istog razmaka elektroda iskrište ima manju probojnu čvrstoću nego za atmosferske prenapone i prenapone industrijske frekvencije /minimum probojnog napona pada kod oko 300 ps trajanja čela udarnog vala (39)/. Prema tome, komutacioni prenaponi su odlučujući za dimenzioniranje izolacije i oni određuju mjere za njihovo ograničenje (4, 39). Mjere za ograničenje i sprečavanje ovih prenapona mogu se u principu svesti na slijedeće: prigušni otpornici se uglavnom ugrađuju bilo na sam prekidač bilo na liniju s pomoćnim prekidačem i uklapaju se u strujni krug kratko vrijeme prije dodira lučnih kontakata prekidača. Druga moguća mjera je sinhrono uklapanje u trenutku prolaza kroz nulu pogonskog napona, te kombinacija navedenih dviju metoda. Obzirom da druga metoda zahtijeva poseban upravljački uređaj i postavlja oštre zahtjeve na mehanizam i pogon prekidača u pogledu repetibilnosti vremena uklopa, uglavnom je u primjeni prva metoda. Naravno, izbor optimalne veličine otpornika i vremena u kojem on treba biti uključen u struj-

ni krug, igra odlučujuću ulogu za efikasnost prigušenja prenapona.

5.1.2. Porast nazivnih struja

S porastom prenosnog napona očekuje se i porast nazivnih struja do vrijednosti 6000-8000 A (5, 12, 15). Prekidači visokog napona rade se danas iz modula 72-170 kV i nazivne struje do 3150 A, i čini se, da znatno povećanje nazivne struje modula predstavlja izuzetno težak zadatak.

5.1.3. Stabilnost sistema i vrijeme prekidanja

U slučaju prolaznih kvarova na prenosnom vodu (jednopolni preskok prema zemlji) općenito se primjenjuje metoda kratkotrajnog odvajanja mjesta kvara od izvora, te nakon kratke pauze ponovni uklop (tzv. automatski ponovni uklop). U 80% slučajeva dalje napajanje energijom, nakon ovakvog kratkog prekida, odvija se nesmetano. Za ovo je neophodno ispuniti dva uvjeta:

- u toku beznaponske pauze probojna staza mora biti deionizirana do te mjere da izdrži dielektrična naprezanja nakon ponovne uspostave napona,
- u toku trajanja kratkog spoja i beznaponske pauze broj okretaja rotora generatora smije se samo toliko promijeniti da nakon ponovnog uklopa utitira u stari ili novi položaj ravnoteže.

Budući da je trajanje beznaponske pauze određeno potrebom deionizacije staze kvara, ono se drži fiksnim 0,3 sek. Ostaje, dakle, kao elemenat koji utiče na tranzientnu stabilnost, a na koji se može izvana uticati, vrijeme trajanja kratkog spoja prije otvaranja prekidača. Osim dužine trajanja kratkog spoja, na stabilnost utiče veličina prenosne snage prije kvara i konfiguracija mreže, tj. eventualno postojanje obilaznih puteva kojim se energija može slati u sistem u toku beznaponske pauze na vodu u kvaru (postojanje dvostrukih vodova). Općenito, može se skraćivanjem trajanja kratkog spoja uticati na povećanje prenosne snage kod koje je još osigurana dinamička stabilnost. Za sisteme s relativno kratkim vodovima između čvorišta mreže i do prenosnih napona 420 kV, što odgovara evropskim prilikama, istraživanja su pokazala da skraćivanje ukupnog vremena prekidanja od 3 na 2 periode ima vrlo mali uticaj na stabilnost (4).

U nekim zemljama (SAD, Japan, Kanada) ipak se ponekad i na ovom naponu specificira ukupno vrijeme prekidanja od 40 ms. Na naponima iznad 420 kV kod jednostrukih vodova, a promatrajući i samo jednopolni zemni spoj, postoji određen uticaj skraćivanja vremena prekidanja od 3 na 2 periode, dok kod dvostrukih vodova vrijeme prekidanja od 3 periode sasvim zadovoljava (4). Gornja ocjena napravljena je uz izuzetak slučaja trolnog i dvopolnog kratkog spoja, koji su na naponima iznad 420 kV zbog velikih međufaznih razmaka, sasvim malo vjerovatni. U SAD, Japanu, SSSR i nekim drugim zemljama se iz razloga stabilnosti prenosa dugim vodovima, kao i smanjenju naprezanja opreme u kratkom spoju za napone 550 kV i više, zahtijeva ukupno vrijeme prekidanja 40 ms (9, 16). Kako je ranije rečeno, u ovom pogledu do sad su najviše uspjeha imali prekidači s komprimiranim zrakom.

5.2. Pouzdanost i održavanje

Potreba što ekonomičnije eksploatacije prenosnog sistema i distributivne mreže nameće potrebu za skraćivanjem prekida pogona radi održavanja i kontrole kao i svođenje vjerovatnosti havarija na najmanju moguću mjeru. U cijelom sistemu prenosa i distribucije električne energije sklopna oprema i njena pouzdanost je od prvorazrednog značaja. Ovo zahtijeva konstrukciju i proizvodnju sklopnih aparata, čija bi trajnost i pouzdanost u radu bila takva da produži periode između kontrola i revizija što je moguće više. Posljednjih godina aktuelna je diskusija o mogućnosti realizacije tzv. aparata bez održavanja, te su u tom smislu obavljene i obimne studije (40).

Kod aparata visokog napona pouzdanost aparata (prekidača) ima više aspekata od kojih su glavni: dimenzioniranje i održavanje vanjske izolacije, održavanje kvaliteta medija za gašenje električnog luka, trajnost kontaktnog sistema te pouzdanost i trajnost mehanizma i pogona.

U pogledu kvaliteta vanjske izolacije aparata teško je u ovom momentu govoriti o otklanjanju potrebe održavanja za aparate montirane na slobodnom prostoru, pogotovo u uslovima atmosferske zagađenosti. Nasuprot tome, kod metalom oklopljene izvedbe (s gasom SF₆), ovo je u potpunosti ostvarljivo. Povećavanjem pogonskog napona ovaj problem postaje sve aktuelniji jer je udio troškova

održavanja izolacije u ukupnim eksploatacionim troškovima sve značajniji. Na primjer, za jedno srednje postrojenje 420 kV, s ukupnom površinom izolatora od oko 16.000 m², neophodno je oko 60 tona zaštitne masti. Ako bi potrebno vrijeme zamjene zaštitnog sloja bilo kraće od tri godine, s ekonomskog gledišta može se isplatiti stavljanje postrojenja u zgradu (9). Ovo može biti jedan od važnih faktora u prodoru punoizoliranih postrojenja u gasu SF₆.

Što se tiče pouzdanosti prekidača, za glavne sisteme prekidača visokog napona može se rezimirati slijedeće:

Kod maloukljnih prekidača zahvaljujući ekstremnoj jednostavnosti komore za gašenje luka, stepen mehaničke pouzdanosti uglavnom ovisi o mehanizmu i pogonu. U pogledu električne trajnosti ovi prekidači stoje nešto lošije od prekidača s komprimiranim zrakom i gasom SF₆. Ulje, zbog pojave ugljika kao produkta razlaganja električnim lukom, nakupljanja vlage zbog temperaturnih promjena te oksidacije u dodiru sa zrakom, mora biti periodički zamjenjivano. Zbog relativno dužeg trajanja luka kao i visokog napona gorenja, oslobađa se u toku prekidanja relativno velika energija, što utiče na povećano trošenje materijala kontakata i komore za gašenje.

Nasuprot navedenom, mehanizam, kontaktni sistem i komora za gašenje znatno su kompleksniji kod prekidača s komprimiranim zrakom. S druge strane, kod ovih prekidača potreba zamjene medija za gašenje, ne postoji. U pogledu električne trajnosti, zbog dimenzija komore, mogu kontaktni elementi biti bogatije dimenzionirani, vrijeme gorenja luka kod velikih struja kratkog spoja veoma je kratko (≤ 10 ms) te se dobrim izborom materijala kontakata postiže visoka električna trajnost. Ipak, neophodna je češća periodična provjera sistema komprimiranog zraka i pogona.

Sa stanovišta trajnosti i pouzdanosti od posebnog su interesa prekidači s gasom SF₆. Razvojem posljednjih godina postignuto je znatno pojednostavljenje komore za gašenje i smanjenje broja i mase pokretnih dijelova kod potisnih prekidača. Mali napon gorenja luka (do nekoliko volti) te trajanje luka, koje nije veće od 15 ms, djeluje povoljno na trošenje kontakata i dijelova komore za gašenje te se može osigurati znatna električna trajnost. Dekompozicija gasa pod djelovanjem električnog luka i agresivni

produkti raspada, uglavnom, ne predstavljaju veće probleme zahvaljujući razvoju efikasnih apsorbera, a ni problem kondenzacije vlage u potisnim prekidačima s pritiskom 3-4 kp/cm² ne ugrožavaju realizaciju vrlo pouzdanih prekidača s minimalnim održavanjem u toku dugog vijeka eksploatacije.

Autori studije, koja je spomenuta (40), smatraju da nije iluzorno razmatranje realizacije u doglednoj budućnosti prekidača visokog napona bez održavanja u toku životnog vijeka od 25 godina. Smatra se da pri tom glavnu pažnju treba posvetiti fabričkoj kontroli materijala, komponenata i montaže kao i tipskoj provjeri pouzdanosti, o čemu su dati i detaljniji prijedlozi.

Na srednjem naponu za malouljne prekidače postavljaju se uglavnom slični problemi kao i na visokom naponu. Magnetski zračni prekidači su uglavnom pouzdaniji u radu, tražena mehanička i električna trajnost se lakše postiže i kod njih nema potrebe za zamjenu medija za gašenje. Posebno mjesto u pogledu pouzdanosti, pod pretpostavkom zadovoljavajućeg ponašanja u pogledu stvaranja prenapona, zauzimaju vakuumski prekidači. Zahvaljujući malim hodomima kontakata te maloj pokretnoj masi, potrebna energija pogona je znatno manja nego kod drugih vrsta prekidača, te se postiže ekstremno visoka mehanička trajnost. Zahvaljujući razvoju kontaktnih materijala, i električna trajnost je dovedena do takvog nivoa da se već sad stvarno može govoriti o aparatima bez održavanja u toku normalnog životnog vijeka. Visoka cijena i zračnih i vakuumskih prekidača u odnosu na malouljne te visoki stepen pouzdanosti, koji su dostigli i ovi posljednji, uzrok je da se u Evropi ne može očekivati njihova šira primjena u distribuciji.

Na niskom naponu, obzirom da se ne postavlja problem izolacije i zamjene medija za gašenje luka, pouzdanost se svodi na mehaničku trajnost mehanizma i pogona i na električnu trajnost kontakata. Zahvaljujući smanjenju pokretnih masa i razvoja kontaktnih materijala, pouzdanost ovih aparata je veoma visoka i kod mnogih izvedbi nije potrebno održavanje u toku životnog vijeka.

5.3. Istosmjerni prenos - sklopni aparat

Raspoloživi podaci govore o ekonomskoj opravdanosti prenosa električne energije istosmjernom strujom ukoliko se udaljenosti

kreću 800-1200 km zračnim vodom, 80-120 km podzemnim kablom i preko 30 km podmorskim kablom (3). Dosad realizirani objekti odnose se većinom na prenos energije između dvije tačke, a naponi prenosa se kreću između ± 150 kV do ± 750 kV. U ovakvim slučajevima sve manipulacije u pogonu mogu biti obavljene bez sklopnih aparata upravljačkom rešetkom pretvaračkih ventila. U posljednje vrijeme, međutim, sve veći je interes za sisteme prenosa istosmjernom strujom s više čvorišta (12). Mogućnost manipulacije u ovakvom sistemu vrlo je ograničena ili nije moguća bez odgovarajućih sklopnih aparata. U skladu s tim posljednjih godina oživio je interes za razvoj jednog istosmjernog prekidača visokog napona. Istraživanja pokazuju da se sve manipulacije ovakvim sistemom sa više čvorišta, uz zadržavanje postojećeg sistema regulacije struje pretvarača, mogu obavljati jednim aparatom, koji bi prekidao struje reda veličine nazivne struje uz stacionarni povratni napon, koji je i u slučaju prekidanja pogonske struje i u slučaju kratkog spoja, kad sistem regulacije pretvarača prethodno svede struju do veličine reda nazivne struje, znatno niži od nazivnog napona mreže. U ovim okvirima potrebnih performansa kreću se i trenutne tehničke mogućnosti rješenja istosmjernog prekidača. Za razliku od prekidača za izmjeničnu struju, prekidač istosmjerne struje mora sam "proizvesti" nulu struje. Kao posljedica toga prekidač mora apsorbirati veliku količinu energije, koja se sastoji od energije koju daje izvor u toku prekidanja, i magnetske energije sadržane u sistemu. Prekidanje je u principu moguće postići jednim prekidačem s vrlo visokim naponom luka, koji bi uz prihvatljivo trajanje luka, sveo prekidnu struju na nulu. Obzirom međutim da prelazni povratni napon, nakon prekidanja, ovisi o naponu prekidača (luka) u toku prekidanja, koji se u izvjesnim slučajevima direktno superponira s naponom mreže, to napon prekidača u toku prekidanja mora biti ograničen da se ne ugrozi nivo izolacije sistema. Iz tih razloga u gore opisanom sistemu, kad se sva prekidanja svede na prekidanja struje reda veličine nazivne struje, napon prekidača (luka) ne smije preći vrijednost oko $0,6 U_n$ (42).

Istraživanja realizacije prekidača visokog napona za istosmjernu struju kreću se od gore opisanog direktnog svođenja struje na nulu visokim naponom luka (43) do sistema s induciranjem umjetnog prolaza struje kroz nulu komutiranjem prekidača na paralelnu granu, koja se sastoji od kondenzatora, oscilatornog kru-

ga ili jednostavno apsorbera energije u obliku otpornika (41,42), ili kombinacijom ova dva rješenja. Direktnim prekidanjem električnim lukom postignuto je prekidanje struje do 645 A uz napon 85 kV (43).

Vrijeme, kad bi mogao biti realiziran dovoljno kompaktan i ekonomičan komercijalni istosmjerni visokonaponski prekidač, u ovom momentu je teško prognozirati.

6. Istraživanje, razvoj i eksperimentalna baza

Sklopna tehnika je jedna od onih područja tehnike u kojem još uvijek najveći dio informacija, potrebnih za razvoj novih sistema i aparata, konstruktor crpi iz prethodnih iskustava na aparatima određenog tipa i direktnih ispitivanja i dotjerivanja na modelu, ili ako se radi o radikalno novom pravcu razvoja, iz empirijskih podataka prethodno provedenih bazičnih eksperimentalnih istraživanja. Poznavanje fizikalnih procesa, posebno pri gašenju električnog luka, te teoretski modeli, koji bi omogućavali matematički tretman zadatka, još uvijek su, zahvaljujući kompleksnosti pojava, na takvom nivou da najčešće omogućavaju tek kvalitativni uvid o uplivu pojedinih elemenata na efikasnost određenog sistema i rješenja. Stoga se općenito u ovoj oblasti pridaje izuzetna važnost eksperimentalnim istraživanjima i ispitivanju već izvedenih konstrukcija. Ovo pak zahtijeva sve rafiniranije metode mjerenja i sve skuplju i kompleksniju laboratorijsku opremu.

Neki od osnovnih zadataka, vezanih za razvoj sklopne tehnike su slijedeći:

- eksperimentalno i teoretsko istraživanje osnovnih fizikalnih pojava i dinamičkih karakteristika električnog luka velike snage i posebno procesa oko nule struje;
- istraživanje pojava interakcije električnog luka i mreže te prelaznih pojava u mreži, vezanih za djelovanje prekidača;
- bazična istraživanja proboja čvrstih, tekućih i gasnih izolacionih sredina;
- eksperimentalno i teoretsko istraživanje električnih kontakata i kontaktnih materijala;

- istraživanje i razvoj novih principa gašenja luka te osnovnih smjernica za dimenzioniranje sistema gašenja luka;
- razvoj mjerne tehnike i metode ispitivanja na području visokonaponskih i visokoučinskih ispitivanja;
- razvoj mjernih metoda za bazična eksperimentalna istraživanja;
- razvoj i ispitivanje samih sklopnih aparata i postrojenja.

Pokušat ćemo ocrtati neke od posebnih problema, koji trenutno zaokupljaju istraživače na području sklopne tehnike širom svijeta.

6.1. Električni luk, interakcija prekidača i mreže

Električni luk u prekidaču je ekstremno kompleksna pojava. Faktički postoje tri osnovne varijable, vezane za djelovanje prekidača u mreži: sam električni luk, vanjski strujni krug i djelovanje medija u toku gašenja. Svaka od ovih varijabli, osim što je sama po sebi teška za egzaktno teoretsko definiranje, na kompliciran način stupa u međudjelovanje s ostale dvije.

U najjednostavnijoj formulaciji električni luk se sastoji iz tri izrazito odvojena područja: katodnog područja, stabla luka i anodnog područja. Dok kod kratkih lukova, kakvi se pojavljuju u prekidačima niskog napona te kod vakuumskih prekidača, prielektrodna područja igraju važnu ulogu kod gašenja električnog luka, u prekidačima visokog napona procesi transporta energije u stablu luka odlučuju o dinamičkom ponašanju luka i njegovoj deionizaciji nakon prolaza struje kroz nulu.

Posljednjih nekoliko decenija u oba pravca tj. proučavanju kratkih lukova i prielektrodnih pojava te sagledavanju energetskog bilansa i transporta energije u stablu luka, vršena su intenzivna istraživanja i učinjen vidan napredak (44, 45). Posebno je posljednjih godina oživio interes da se na osnovu ranije formuliranih teoretskih modela dinamičkog luka, u radovima Cassie, Mayr, Browne, Rieder, Urbanek-a, poopćavanjem i rafiniranjem ovih modela usklade eksperimentalni i teoretski rezultati istraživanja, posebno u vezi s istraživanjima interakcije luka i mreže te interakcije luka i struje gasa u mlaznicama sistema za gašenje prekidača s komprimiranim zrakom i prekidača s gasom SF₆ (46-49). Svi ovi

pokušaji, iako predstavljaju veliki napredak u razumijevanju fenomena gašenja električnog luka, tek u ograničenom obimu daju slaganje s eksperimentalnim rezultatima i tek neku orijentaciju kod rješavanja zadataka vezanih za konstrukciju sistema gašenja. Izvor teškoća suštinski leži u činjenici da se fenomeni, koji inherentno zahtijevaju tretman preko nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačbi, žele opisati pomoću običnih linearnih diferencijalnih jednačbi. Stoga se predlažu i drugačiji prilazi kao što je tzv. kibernetički model luka koji, iako pojave opisuje običnim diferencijalnim jednačbama, konstante koje u ranijim modelima definiraju jednačbe, zamjenjuje odgovarajućim funkcijama (50). Drugim jednim prilazom predlaže se direktno numeričko rješavanje nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačbi energetskog bilansa poput postupka kojim se rješavaju problemi prenosa topline (51).

Naravno, uspjeh svih ovih i sličnih nastojanja u najvećoj mjeri ovisi o tačnosti i poznavanju ulaznih podataka, kojim se definiraju jednačbe luka tj. od stepena tačnosti eksperimentalnih podataka o dinamičkom ponašanju luka u raznim medijima. Do sada kumulirani eksperimentalni podaci ni izbliza ne omogućavaju egzaktno rješavanje problema gašenja luka, ma o kakvom teoretskom modelu se radilo, te će biti neophodan obiman eksperimentalni rad, želi li se postići postavljeni cilj.

6.2. Metode istraživanja fizikalnih svojstava dinamičkog luka

Kao što je rečeno, za dobivanje jasnije slike o fizikalnim pojavama dinamičkog ponašanja luka i omogućavanja verifikacije teoretskih modela, neophodne su rafinirane i tačne metode mjerenja, koje djelomično moraju biti za ovu svrhu sasvim specijalno razvijene.

Jedno od veoma važnih oruđa diagnostike luka je ultrabrza fotografija. Da bi se uspješno izvlačili zaključci iz snimaka ultra brzom filmskom kamerom, neophodno je da se vremenski razmak dvaju snimaka približi po redu veličine vremenskoj konstanti luka, odnosno da brzina snimanja dostigne više stotina hiljada snimaka na sekundu.

Temperatura, sastav plazme i gustina elektrona u električnom luku od neocijenjive su vrijednosti za sagledavanje pojava dinamičkog ponašanja luka. U ovu svrhu upotrebljavaju se metode

spektrografije (52) i masene spektrografije (21). U novije vrijeme ovim metodama, npr., razjašnjena su svojstva i ponašanje luka u gasu SF₆, o čemu je govoreno u tač.3.3. ovog izlaganja.

Čitav niz drugih uređaja i mjernih metoda bio je razvijen posljednjih godina za mjerenje napona, struje i pritiska u području oko nule struje te interakcije struje gasa i luka.

6.3. Visokoučinska ispitivanja

Najveći dio podataka za praktične potrebe razvoja prekidača dobiva se ispitivanjem prekidne moći u visokoučinskim ispitnim stanicama. Ispitivanja se mogu provoditi direktno, tj. tako da se ispitna prekidna struja i povratni napon dobivaju iz istog izvora. Kao izvor može služiti prenosna mreža ili specijalni sinhroni generatori, a prave se i kombinacije, tj. sinhronizacija ova dva izvora. Iz ekonomskih razloga prekidna snaga najvećih laboratorija za direktna ispitivanja ne prelazi vrijednosti 12-15 GVA kod napona 420 kV. Porast prekidne moći i prenosnih napona, o kome je ranije bilo govora, i s tim u vezi potreba ispitivanja većih jedinica s prekidnom moći do 50 kA, doveo je do općenitog prihvatanja sintetskog načina ispitivanja, kod koga postoje posebni izvori prekidne struje i povratnog napona. Prihvatljivost i ekvivalentnost ovakvih ispitivanja, s obzirom na stvarna naprezanja prekidača u mreži, predstavljali su poseban problem, a istraživanja posljednjih godina dovela su do prihvatanja metode injektiranja struje kao metode koja daje najbolju saglasnost s direktnim ispitivanjem, posebno za prekidače sa ne prevelikim naponom gorenja luka, kao što su prekidači s komprimiranim zrakom i prekidači s gasom SF₆. Posebno je aktuelno pitanje stvarnog početnog i punog oblika tranzientnog povratnog napona u raznim uslovima kvara u mreži, s čim u vezi su vršena obimna mjerenja u mreži (53), te dobivanja odgovarajućeg tranzientnog povratnog napona u sintetskom ispitnom krugu. Pitanje raspodjele napona na prekidačima s više prekidnih elemenata i ekvivalentnost ispitivanja po elementima takođe je predmet intenzivnih istraživanja posljednjih godina (48, 54, 55).

6.4. Istraživanje proboja dielektrika i visokonaponska ispitivanja

U tehnici visokog napona kod istraživanja dielektričnih

svojstava raznih medija, kliznih staza izolatora, formiranja i računanja statičkih i dinamičkih električnih polja, unutrašnjih i vanjskih prenapona, gubitaka korone, parcijalnih pražnjenja, uticaja zagađenja izolatora te uticaja jakih električnih polja, kao baza svih istraživanja pojavljuje se eksperiment, te odatle proizilazi nezamjenljiva uloga dobro opremljenih modernih laboratorija visokog napona.

U bazičnim istraživanjima posebno mjesto se posvećuje izučavanju mehanizma proboja čvrstih, tečnih i gasovitih dielektrika.

Kao što je ranije spomenuto, porastom pogonskih napona i zagađenosti atmosfere, sve aktuelnije postaje izučavanje proboja preko kliznih staza izolatora i pronalaženje metoda za otklanjanje uticaja zagađenja na probojnu čvrstoću.

Povećavanje napona traži sve veću visinu hala visokonaponskih laboratorija, koja za ispitivanja opreme za pogonski napon 1500 kV dostiže visinu reda 60 m. Danas je već planirana izgradnja dvije ovakve super-laboratorije (3).

6.5. Električni kontakti i kontaktni fenomeni

Pregled dosadašnjih istraživanja ponašanja električnih kontakata aparata jake struje u raznim pogonskim uslovima pokazuju da je poznavanje osnovnih fizikalnih fenomena vezanih za ovo, još uvijek takvo da ne dozvoljava kvantitativno proračunavanje i dimenzioniranje kontakata bez eksperimentalnih provjera. Ovo se odnosi kako na procese zagrijavanja, zavarivanja u zatvorenom položaju i zavarivanje pri uklopu, tako i na procese erozije električnim lukom u toku prekidanja. Oslonac pri dimenzioniranju traži se u empirijskim podacima i formulama (57). Stoga su neophodni veoma brojni i iscrpni radovi za ustanovljavanje ponašanja kontaktnih materijala kako u različitim, gore spomenutim uslovima djelovanja, tako i njihovog ponašanja u raznim medijima u koje su "uronjeni". Posljednjih godina učinjeni su značajni koraci u razumijevanju i određivanju ponašanja kontakata kao i razvoju novih i boljih kontaktnih materijala (56, 57).

L I T E R A T U R A

1. "Nikola Tesla - Lectures, Patents, Articles"
Nikola Tesla Museum - Beograd 1956.
2. F. Hillebrand
"Zur Geschichte des Drehstromes"
ETZ-A Bd. 80/1959/ H.14 s. 453-461
3. A. Hofmann
"Hochspannungsübertragung heute und morgen"
ETZ-A, Bd. 92 (1971) H.12. s. 663-672
4. E. Slamecka
"Hochspannungs - Leistungsschalter - ihre Beziehungen zur Energietechnik"
ETZ-A, Bd. 95 (1974) H.5 s.245-251
5. V.K. Matbienko, I.M.Bortnik, A.M. Bronštejn
"Sostojanie i razvitie razrabotki proizvodstva vikliučatelei visokogo naprijaženija"
Elektrotehnika № 6, 1975. str.1-6
6. H. Schubert, N. Cuk
"Freiluft-Druckluftschalter Typ DLF, eine anpassungsfähige Baureihe bis 1100 kV Nennspannung für kleine, mittlere und höchste Leistungen"
Brown Boveri Mitt. 60 (1973), 4 s. 164-172
7. O. Slameczka
"Generatorschalter Typ DR 36 in aller Welt"
Brown Boveri Mitt. 60 (1973) 4, s.178-184
8. P.Burckhardt, E. Vadaszi, M. Seidel
"Generatorschalter Typ DR für extrem hohe Betriebs-und Kurzschlussströme"
Brown Boveri Mitt. (1975) 4. s. 131-138
9. C.J.O. Garrard
"Trends in Switchgear Design"
Electrical Review, 185 (1969), № 13, s.449-456
10. W. Rieder
"Milieux d'éclatement des arcs de coupure des disjoncteurs haute tension"
Electro - Revue, 1974, № 48, s. 1713-1719
11. CIGRE, Paris - 1974
- Rapport 13-00 (E.Rouss, Rapport spécial du groupe 13)
- Rapport 23-00 (J.E.Baumann, Rapport spécial du groupe 23)
12. "Rapid increase in SF₆ metalclad switchgear applications"
(Summary of the discussions on substation design and h.v.d.c. transmission at the CIGRE meeting in Paris)
Electrical Review, 13 sept. 1974, s.319-323

13. W. Schaad, M. Kuhn
"Die Weiterentwicklung der Mehrfachunterbrechungsschalter"
Neues von Sprecher - Nr.4, 1970, s.10-15
14. H. Widmer
"Die Schalterreihe F - Schalteinheit FR"
Bull. Oerlikon Nr.391 (1969) s.14-17
15. V.V. Afanasjev, L.K. Greiner
"Novie napravlenija v razvitii apparatov visokogo naprjaženija"
Električestvo N^o 4, 1970, str.22-28
16. G.Köppl, N.Cuk, H.Schubert
"DLF - Druckluftschalter Bewährung und Fortschritt"
Brown Boveri Mitt. 1975 (4), s. 120-127
17. K.H.Yoon, H.E.Spindle
"A study of the dynamic response of arcs in various gases"
IEEE Trans. on PAS, 1959, N^o 40 s.1634-1642
18. T.E. Browne, W.M.Leeds
"A new medium for circuit interruption"
CIGRE, 1960, Rep.11
19. F.Frind
"Über das Abklingen von Lichtbogen"
Z.angew. Phys. Bd 12 (1960), N^o 5, s.231-237, 515-521
20. D.Battaglia
"L'hexafluorure de soufre nouveau moyen d'extinction de l'arc dans les disjoncteurs a haute tension"
Bull. S.F.E. (1962), tome III, N^o 34, s. 523-538
21. S.Fukuda, T.Ushio, T.Ito, T.Miyamoto
"Recent Studies on arc behaviours around current zero in SF₆ gas"
CIGRE, 1968, Rep. 13-03
22. B.J.Calvino, P.Pezzi
"Interruption characteristics of an SF₆ self-extinguishing circuit-breaker influence of the initial rate of rise of the transient recovery voltage and of current zero phenomena"
CIGRE, 1968, Rep. 13-04
23. B.Müller
"Schwefelhexafluorid als Lichtbogen - Löschmedium"
ETZ-A Bd. 94 (1973) H.7, s.391-395
24. B.Calvino
"New Line of high voltage circuit breakers type MHM"
L'Aparecchiatura elettrica - Magrini technical publication N^o 24 (1968)
25. T.Thoru, N.Seizo, I.Hirochi, H.Kunio, Y.Yoshio
"Development of 240/300 kV, 50 kA, 2000 A, 4000 A, 8000 A, 2 cycle puffer type SF₆ gas circuit breakers"
Hitachi Rev. 1974. 23, N^o 9, s.343-351

26. R.Frink
SF₆ Magnetic-Puffer Circuit Breaker for 34,5 kV, 1500 MVA"
IEEE Trans. on PAS, 1968, 87, N^o 3, s. 742-749
27. I.Takahashi, Y.Yoshika, K.Hirosawa, M.Tsukushi
"Research on a New Type Magnetic Puffer Gas Circuit Breaker"
IEEE Trans. on PAS 1974, 93, N^o 1, s.421-428
28. R.C. Van Sickle, R.N. Yeckley
"A 500 kV Circuit Breaker Using SF₆ Gas"
IEEE Trans. on PAS, 1965, 84, N^o 10, s.892-901
29. R.N. Yeckley, C.F.Cromer
"New SF₆ EHV Circuit Breakers for 550 kV and 765 kV"
IEEE Trans. on PAS, 1970, 80, N^o 8, s.2015-2023
30. S.J. Kurowski, G.W.Barlow
"500 kV C.B. failures traced to gas-supply moisture"
Electr. World 1968, 170, N^o 6, s.48-49
31. T.Ushio, I.Shimura, Sh.Tominaga
"Practical problems on SF₆ gas circuit breakers"
IEEE Trans. on PAS, 1971, 90 N^o 5, s. 2166-2174
32. A.I.Poltev
Elegazovie apparati (str.121-131)
Energija - Leningradskoe otdelenie 1971
33. K.Fujiwara
"Arc Quenching Behavior of Rotary Arc in Sulfur Hexaflorid"
Proc.of the 7th. International Conf.on Elec.Contact Phen.
- Paris, juin 1974, s.266-272
34. D. Morkusch
"Untersuchungen am rotierendem Schaltlichtbogen in Schwefelhexafluorid"
Elektrie H.10 (1967) s.364-366
35. M.Okawa, H.Koiike
Switching Surge and Application of Vacuum Switching Device"
IEEE Conf. paper, C 74, 173-1, IEEE PES Winter Meeting 1974
36. M.Murano, F.Fujii, H.Nishikawa, S.Nishiwaki, M.Okawa
"Voltage Escalation in Interrupting Inductive Current by Vacuum Switches"
IEEE Trans. on PAS, 1974, 93 N^o 1, s.264-271
37. R.B.Shores, V.E.Philips
"High voltage vacuum circuit breakers"
IEEE Trans. on PAS 1975, 94, N^o 5, s.1821-1830
38. W.Heise, G.F.Luxa
"Die Bemessung der ausseren Isolierstrecken von Geräten für hohe Betriebsspannungen"
ETZ-A Bd. 91 (1970), H.4 s.218-225

39. P.Baltensperger, E.Ruoss
"Surtensions de manoeuvre dans le réseaux a haute et tres haute tension"
CIGRE 1970, Rep. 13-14
40. R.Michaca, J.Verdon, J.C.Okerman, C.Rollier
J.Dayet, B.Tolliet
"Vers le disjoncteur sans entretien"
CIGRE 1974, Rep. 13-06
41. E.V. Bonin, B.Koetzold, K.Möller, G.Oberdorfer,
J.Schwarz, u G.H. Thiel
"A method of current interruption in HVDC networks by means of AC circuit breaker with adopted arc-characteristics and energy absorbers"
CIGRE 1970, Rep. 13-10
42. H.Eisenack, K.W.Kanngiesser, D.Kind, B.Koetzold, W.Schulz, W.Pucher
"Disjoncteur dans les systemes multiterminaux maillés de transport en courant continu a haute tension"
CIGRE 1972, Rep. 13-08
43. K. Möllenhoff
"Untersuchungen zur Entwicklung eines Lichtbogen- Olstömungs-schalter für die Hochspannungs - Gleichstrom - Übertragung"
Diss. TU Braunschweig, 1969
44. I.S.Taev
Električeskaja duga v apparatah nizkogo naprjaženija"
Izd. "Energiya", Moskva, Leningrad, 1965
45. W. Rieder
"Plasma und Lichtbogen"
Verlag Vieweg, Braunschweig, 1967.
46. B.W. Swanson, R.M.Roidt, T.E.Browne Jr
"Arc cooling and short line fault interruption"
IEEE Trans. on PAS, 1971, 90, N^o 3, s.1094-1102
47. B.W.Swanson, R.M.Roidt
"Boundary layer analysis of an SF₆ circuit breaker arc"
IEEE Trans.on PAS, 1971, 90, N^o 3, s. 1086-1093
48. L.Ferschl, H.Kopplin, H.H.Schramm, E.Slamecka, J.D.Welly
"Recherches théoretique et experimentale concernant les disjoncteur a gaz comprimé dans les condition de défaut kilométrique"
CIGRE, 1974. Rep. 13-07
49. H.E.Lee, H.K.Messerle
"New method for solving the energy-balance equation for moving-boundary a.c.arcs"
Proc.Inst.Elec.Eng. 1975, 122, N^o 2, s.227-231
50. A.Hochreiner, A.Grütz, J.Schwarz, H.G.Thiel
"Etude des arcs dans les disjoncteurs a l'aide d'une maquette cybernetique et sous l'influence de la turbulence"
CIGRE, 1972, Rep. 13-10

51. R.L.Phillips
"The behavior of dynamic electric arcs"
Aerospace Research Laboratories, ARL 64-150 sept.1964.
52. H.Franke, A.v.Trzebiatowski
"Bestimmung von Temperatur und Elektronendichte mit einem Spektrographen geringer Dispersion in einem Plasmastrahl"
Wiww. Ber. AEG-Telefunken 41 (1968) 2, s.72-75
53. G.Catenacci, L.Paris, J.Couvreur, M.Pouard
"Transient recovery voltage in French and Italian high voltage networks"
Trans.IEEE on PAS, 1967, 86 N^o 11 s.1420-1431
54. B.Calvino, G.Mazza, B.Mazzoleni, V.Villa
"Quelques aspects de contraintes supportées par les disjoncteur H.T. a la coupure dun court-circuit"
CIGRE 1974, Rep. 13-08
55. L.Ferschl, H.Kopplin, E.Pflaum, E.Slamecka, W.W.Waterschek
"Shéma a circuit triple pour l'essais des disjoncteur a haute tension dans les condition du defaut kilometrique"
CIGRE 1970, Rep. 13-05
56. A.Erk
"Grundsätzliche Untersuchungen an Kontaktstücken unter besonderer Berücksichtigung der Bedingungen in Starkstromschaltgeräten"
Proc. on the Third Int. Sym. on Elec. Contact Phenomena Orono, Maine 1966, s.263-275
57. H.J.Mau
"Stand der Erkenntnisse über die Beanspruchung elektrischer Kontakte in der Starkstromtechnik"
Vorträge 5 int. Tagung über Elek.Kontakte, München, 1970, s. 29-51.

Ivan Naumovski, dipl.inž.
"Rade Končar" Tvornica el.aparata
Zagreb

NESTABILNOST DINAMIČKOG LUKA PRI ISKLAPANJU MALIH INDUKTIVNIH STRUJA

Razmotreni su parametri luka i uvjeti kod kojih dolazi do pojave nestabilnosti luka. U analitičkom prikazu luka korištene su pretpostavke Mayra. Prikazano je međusobno djelovanje između luka struje, magnetiziranja i mreže.

Visokofrekventni titraji struje luka dovode do prekida malih induktivnih struja znatno prije prirodne nultocke struje ("odrez" struje). Koristeći Hurwitzove kriterije stabilnosti članak daje osnovne parametre za izračunavanje veličine odrezane struje.

Opisano je ispitivanje isklapanja struje magnetiziranja transformatora pomoću maloljnih prekidača i rastavnih sklopki srednjeg napona proizvodnje "Rade Končar".

DYNAMIC ARC BEHAVIOUR IN CIRCUIT-BREAKERS WHEN INTERRUPTING SMALL INDUCTIVE CURRENTS

Arc parameters and thermal conditions leading to arc instability phenomena, and Mayr's mathematical arc model, are used in order to present the interaction between the arc of the small inductive current and the network.

High frequency arc current oscillations lead to premature interruptions of the small inductive current long before current-zero /current-chopping phenomenon/. Hurwitz's stability criteria are used in order to present the basic current chopping parameters.

Tests involving interruption of small inductive currents with medium voltage, minimum oil circuit-breakers and disconnector switches manufactured by "Rade Končar", are described.

1. U V O D

Električna izbijanja u obliku električnog luka prvi su otkrili V.V.Petrov u Rusiji 1800.god. i H.Davy u Engleskoj oko 1891.god. Nikola Tesla je, u vezi sa svojim patentima "Sistem električne rasvjete", "Električna inkadescენტna lampa" i "Inkadescენტno električno svijetlo", napisao /8/:

"S visokofrekventnim strujama se mogu dobiti bešumni lukovi s time da se regulacija lampe vrši dosta teško.

Zanimljivo svojstvo luka dobivenog ovim brzo promjenljivim strujama je njegova stabilnost. Zato postoje dva razloga, jedan uvijek prisutan, drugi samo ponekad. Prvi razlog je karakter struje, drugi - svojstva izvora struje. Prvi razlog je i važniji i temelji se izravno na brzini promjena. Kod luka izmjenične struje periodički se mijenja temperatura plinovitog stupca luka, a time i otpor luka. Otpor luka se bitno mijenja s temperaturom plinovitog stupca, postajući praktički neizmjeran kada je plin između elektroda hladan.

Stabilnost luka ovisi prema tome o mogućnosti hlađenja stupca luka; zbog toga se ne može održati luk struje koja se mijenja samo nekoliko puta u sekundi. S druge strane luk istosmjerne struje se može vrlo lako održati zbog konstantne temperature i malog otpora stupca luka. Što je viša frekvencija, manji je vremenski interval tijekom kojeg se luk može hladiti i time povećavati svoj otpor".

Nikola Tesla je ovo pisao 1891.god. Smatra se da je prvo temeljito istraživanje električnog luka vršila Engleskinja Herta Ayrton 1902. god. Njezini radovi, kao i svi kasniji radovi o luku, samo su potvrdili sve one postavke o luku od kojih je polazio i Nikola Tesla.

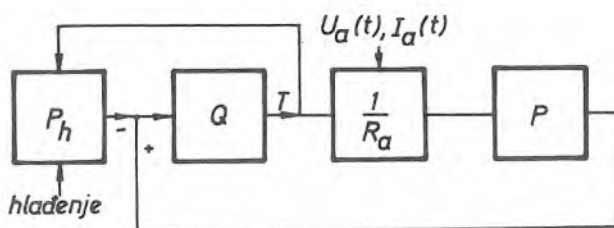
2. PARAMETRI DINAMIČKOG LUKA I NJIHOVE OVISNOSTI

Sva razmatranja o teorijama luka počinju od energetske bilance luka

$$\frac{dQ}{dt} = U_a(t) \cdot I_a(t) - P_h \quad (1)$$

Ova toplinska bilanca luka pokazuje ravnotežu vremenske promjene toplinske energije akumulirane u luku dQ/dt snagom koja se stvara u luku (produktu napona i struje luka), umanjenom snagom P_h koja se odvodi od luka hlađenjem.

Energetska bilanca dinamičkog luka se može razmatrati tako da se luk prikaže kao regulacioni sistem s povratnom vezom kao na sl. 1 /3/



Slika 1. El.luk kao regulacioni sistem s povratnom vezom

Slika 1. pokazuje da je toplina akumulirana u luku definirana razlikom stvorene i odvedene snage ($P - P_h$). Temperatura luka, koja utječe na njegovo hlađenje, određuje i vodljivost luka $1/R_a$. Vodljivost luka konačno, preko struje i napona luka, određuje i snagu koja se stvara u luku. Regulacioni krug je zatvoren i razmatranja se mogu vršiti pomoću postupaka poznatih u regulacionoj tehnici. Na temelju tih razmatranja može se izraditi i analogni model luka.

Voltamperska karakteristika stacionarnog luka (statička karakteristika luka) ima, kako je poznato, hiperbolni karakter. U jednom od oblika, ova karakteristika se može izraziti jednačom /7/

$$U_{as} \cdot I_{as}^{\alpha} = \text{konst.} \quad (2)$$

Ovdje su U_{as} i I_{as} napon i struja stacionarnog luka, a α - koeficijent koji definira oblik hiperbolne karakteristike stacionarnog luka. Svakoj struji na karakteristici pripada i odgovarajući otpor luka

R_{as} , koji bi se mogao izmjeriti, kada bi struju pod nepromijenjenim vanjskim uvjetima održavali dovoljno dugo konstantnom.

Za razmatranje uvjeta stabilnosti dinamičkog luka izmjenične struje, kao početnu (nultu) točku promatranja uzimamo onu točku u kojoj luk prelazi iz stacionarnog u nestacionarno stanje.

Otpor stacionarnog luka u početnoj točki promatranja se može izraziti kao

$$R_{ao} = \frac{U_{ao}}{I_{ao}} \quad (3)$$

Otpor dinamičkog luka u početnoj točki na prelazu u nestacionarno stanje može se izraziti (uzimajući u obzir negativnost statičke karakteristike luka) kao promjena napona statičkog luka kod male promjene struje luka

$$R_a = - \frac{dU_{ao}}{dI_{ao}} = - \frac{dU_{ao}/dt}{dI_{ao}/dt} = - \frac{U'_{ao}}{I'_{ao}} \quad (4)$$

Jednadžba (2) napisana za početnu točku promatranja daje

$$\frac{dU_{ao}}{dI_{ao}} = -\alpha \frac{U_{ao}}{I_{ao}} \quad (5)$$

Iz relacija (3), (4) i (5) slijedi $\alpha = R_a/R_{ao}$, s time da se vrijednost tog koeficijenta može kretati u granicama $0 < \alpha < 1$.

O ovisnosti otpora dinamičkog luka o ostalim parametrima i uvjetima gorenja luka postoji nekoliko teorija, od kojih su najznačajnije teorije koje su postavili A.M.Cassie (1939.god.), O.Mayr /4/ zatim "Teorija termičke neravnoteže u luku" W.Riedera i J.Urbaneke /6/ i "Kibernetika teorija luka" A.Hochrainera /3/.

Ispitivanja su pokazala da se za slučaj malih struja i za razmatranje pojava u blizini nultoeke prekidne struje može koristiti Mayrova teorija luka.

Osnovna Mayrova pretpostavka je da se hlađenje luka vrši samo površinski, pri čemu je snaga, koja se odvodi od luka hlađenjem, konstantna ($P_h = \text{konst.}$). Na temelju toga se za stacionarni luk u početnoj točki promatranja jednačba (1) može napisati u slijedećem obliku

$$\frac{dQ}{dt} = 0 = U_{ao} \cdot I_{ao} - P_h \quad (6)$$

Prelaskom iz stacionarnog u nestacionarno stanje P_h ostaje i dalje konstantna ($P_h = U_{ao} \cdot I_{ao} = \text{konst.}$), što uvršteno u (1) daje

$$\frac{dQ}{dt} = U_a(t) \cdot I_a(t) - U_{ao} \cdot I_{ao} \quad (7)$$

Mayr je pokazao da između otpora dinamičkog luka i sadržaja topline u luku postoji slijedeća eksponencijalna ovisnost

$$R_a = K e^{-Q/Q_0} \quad (8)$$

K i Q_0 su konstante (Q_0 je karakteristična količina topline koja mijenja otpor luka u odnosu 1 : e).

Deriviranjem jednačbe (8) po vremenu i uvrštavanjem konstante K iz (8) dobiva se

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{Q_0}{R_a} \cdot \frac{dR_a}{dt} \quad (9)$$

Ako se u ovu jednačbu uvrsti derivacija od $R_a = U_a(t)/I_a(t)$, a zatim se dobiveni izraz uvrsti u jednačbu (7), dobiva se nelinearna diferencijalna jednačba

$$Q_0 \left(\frac{1}{I_a} \frac{dI_a}{dt} - \frac{1}{U_a} \frac{dU_a}{dt} \right) = U_a I_a - U_{ao} I_{ao} \quad (10)$$

Sada treba vidjeti da li se ovaj dinamički sistem, nakon promjene početnih uvjeta, vraća u početno stacionarno stanje ili se sve više udaljava od njega.

Nestacionarne vrijednosti napona i struje luka mogu se prikazati kao zbroj početnih stacionarnih vrijednosti i malih poremećaja $u_a(t)$ i $i_a(t)$

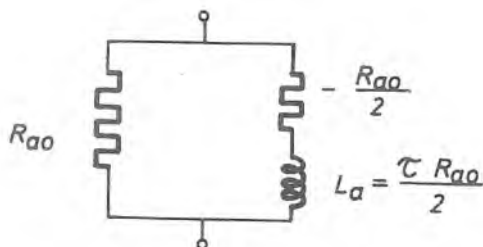
$$U_a = U_{ao} + u_a \quad (11)$$

$$I_a = I_{ao} + i_a \quad (12)$$

U odnosu na male poremećaje, U_{ao} i I_{ao} su sporo promjenljive veličine, pa se ovdje može uzeti da je $dU_{ao}/dt = dI_{ao}/dt = 0$. Imajući ovo u vidu, zatim zanemarujući male veličine drugog reda, koje se dobivaju uvrštavanjem izraza (11) i (12) u jednadžbu (10) označavanjem $P_h = U_{ao}I_{ao}$, $R_{ao} = U_{ao}/I_{ao}$, $\tau = Q_0/P_h$ i na koncu prelaskom u Laplaceovo područje (početni uvjeti su jednaki nuli), dobiva se

$$i_a(p) = -u_a(p) \frac{1}{R_{ao}} \frac{1+p\tau}{1-p\tau} \quad (13)$$

Na temelju jednadžbe (13) dinamički luk se može prikazati s ekvivalentnim strujnim krugom kao na sl.2



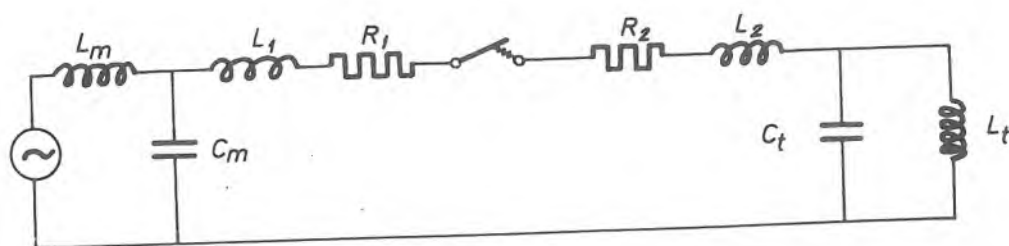
Slika 2. Ekvivalentni strujni krug
Mayrovog luka

Konstanta $\tau = Q_0/P_h$ u izrazu (13) zove se vremenska konstanta luka i ona karakterizira luk kao element u kojem je akumulirana toplinska energija, isto kao što je induktivitet konstanta za akumuliranu magnetsku energiju ili kapacitet - za elektrostatsku energiju.

3. MEĐUSOBNO DJELOVANJE DINAMIČKOG LUKA I MREŽE PRI ISKLAPANJU MALIH INDUKTIVNIH STRUJA

Male induktivne struje su, na primjer, struje magnetiziranja transformatora u praznom hodu, transformatora opterećenih prigušnicom (Petersenkom ili prigušnicom za kompenzaciju kapaciteta dugih vodova) te struje magnetiziranja većih asinhronih motora.

Na slici 3 prikazana je jednopolna nadomjesna shema isklapanja neopterećenog transformatora



Slika 3. Jednopolna nadomjesna shema isklapanja
malih induktivnih struja

L_m, C_m - ekvivalentni induktivitet i kapacitet mreže
(izvora), koja napaja transformator

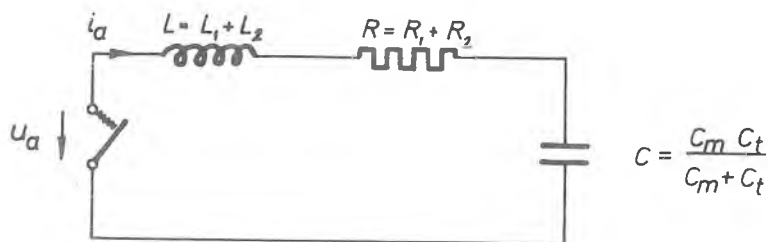
L_t, C_t - ekvivalentni induktivitet i kapacitet tereta

L_1, R_1, L_2, R_2 - ekvivalentni induktiviteti i otpori
spojnih vodova

U prethodnom poglavlju razmotrene su pojave u luku neovisno o ostalim parametrima strujnog kruga. Sada treba razmotriti interakciju tog luka i ostalih parametara strujnog kruga prikazanog u slici 3. Kako je već spomenuto, luk male induktivne struje može se nadomjestiti ekvi-

valentnom shemom prema slici 2, odnosno matematičkim modelom prema jednadžbi (13).

Opadajuća voltamperska karakteristika statičkog luka (2), tj. negativni gradijent otpora dinamičkog luka (4) može biti uzrokom nepri-
gušenog porasta titraja struje luka, koji se javljaju kao vremenski
odziv kod malih poremećaja nestabilnog luka. Superpozicija ovih titra-
ja sa sinusoidalnom strujom (50 Hz) stacionarnog luka dovodi, u tre-
nutku kada visokofrekventni titraji postignu amplitudu jednaku ampli-
tudi osnovne struje, do naglog prekida (odreza) prije prirodne nul-
točke sinusoidalne struje. Frekvencije ovih titraja mjerene
pri isklapanju malih induktivnih struja kreću se do $\nu = 100$ kHz.
Prema tome induktivni otpor transformatora u strujnom krugu u slici
3 se može uzeti kao beskonačan u odnosu na kapacitivni otpor
($\nu L_t \gg 1/\nu C_t$). Isto vrijedi i za induktivni otpor izvora ($\nu L_m \gg 1/\nu C_m$).
Znači, za razmatranje stabilnosti dinamičkog luka, strujni krug iz
slike 3 može se prikazati kao na slici 4.



Slika 4. Pojednostavljeni strujni krug za razmatranje
stabilnosti luka malih induktivnih struja

Obzirom na to da su mali poremećaji napona i struje luka $u_a(t)$ i $i_a(t)$
narinuti u trenutku $t = 0$, početni uvjeti za ovo razmatranje se mogu
uzeti kao da su jednaki nuli, pa u Laplaceovom području za shemu pre-
ma sl. 4 vrijedi

$$u_a(p) = - i_a(p) \left(R + pL + \frac{1}{pC} \right) \quad (14)$$

Ako u ovu jednadžbu uvrstimo izraz za struju luka prema jednadžbi (13), nakon sređivanja dobivamo linearnu diferencijalnu jednadžbu s karakterističnom jednadžbom

$$p^3 + p^2 a_2 + p a_1 + a_0 = 0 \quad (15)$$

pri čemu su koeficijenti

$$a_2 = \frac{1}{L} (R + R_{a0}) + \frac{1}{C} \quad (16)$$

$$a_1 = \frac{1}{LC} (R - R_{a0}) + \frac{1}{LC} \quad (17)$$

$$a_0 = \frac{1}{LC} \quad (18)$$

Korijeni karakteristične jednadžbe (15) određuju rješenje diferencijalne jednadžbe. Neprigušeni titraji napona i struje luka pojaviti će se onda kada su dva od tri korijena karakteristične jednadžbe (15) imaginarna i suprotnog predznaka. Karakteristična jednadžba trećeg reda s takovim korijenima može se napisati u obliku

$$(p - r_1) (p + j\nu) (p - j\nu) = 0 \quad (19)$$

odnosno

$$p^3 - p^2 r_1 + p \nu^2 - r_1 \nu^2 = 0 \quad (20)$$

Izjednačavanjem koeficijenata jednadžbi (15) i (20) dobiva se frekvencija visokofrekventnih titraja struje i napona luka ν .

Uvjeti, kod kojih dolazi do nestabilnosti luka, mogu se dobiti iz Hurwitzovih kriterija nestabilnosti /2/. Prema tim kriterijima nužni uvjeti za nestabilnost su ispunjeni onda, kada su koeficijenti karakteristične jednadžbe negativni. Da ti uvjeti budu i dovoljni, još je potrebno i da Hurwitzova determinanta bude negativna

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ 1 & a_2 \end{vmatrix} < 0 \quad (21)$$

Razvijanjem determinante nejednadžbe (21), uz zanemarenje otpora $R = R_1 + R_2$ (sl. 3), dobiva se slijedeći uvjet kod kojeg dolazi do nestabilnosti luka

$$LC > \tau^2 - \tau R_{ao} C \quad (22)$$

Ovaj uvjet pokazuje da induktiviteti tereta i izvora povećavaju nestabilnost dinamičkog luka.

Drugi uvjet za nestabilnost dinamičkog luka pri isklapanju malih induktivnih struja proizlazi iz $a_1 < 0$ i on glasi

$$\tau < R_{ao} C \quad (23)$$

Ako se vremenska konstanta luka τ smatra pravom konstantom, uz kapacitet strujnog kruga C , luk postaje nestabilan kod određenog otpora stacionarnog luka R_{ao} , tj. kod određene struje luka I_{ao} . Kako je $R_{ao} = U_{ao}/I_{ao} = P_h/I_{ao}^2$, uvjet (23) može se napisati u obliku

$$I_{ao}^2 < \frac{P_h C}{\tau} \quad (24)$$

Ako je amplituda visokofrekventnih titraja luka tako velika da dođe odmah do strmog prekida (odreza) sinusoidalne struje, vrijednost odrezane struje iznosi

$$I_o = \sqrt{\frac{P_h C}{\tau}} \quad (25)$$

Nakon odreza struje elektromagnetska energija nagomilana u induktivitetu tereta pretvara se u elektrostatsku energiju koju akumulira kapacitet nastezaljkama tereta

$$\frac{L_t I_c^2}{2} + \frac{C_t U_o^2}{2} = \frac{C_t U^2}{2} \quad (26)$$

Ovo novo titranje u strujnom krugu, nakon gašenja luka, rezultira prenaponom na strani tereta s amplitudom (gledano jednofazno)

$$U = \sqrt{U_o^2 + I_o^2 \frac{L_t}{C_t}} \quad (27)$$

Iz ove jednadžbe proizlazi na prvi pogled da kapacitet C_t smanjuje amplitudu prenapona, što nije realno, jer taj isti kapacitet povećava i veličinu odrezane struje /5/.

Protekla razmatranja, vršena za isklapanje malih induktivnih struja, vrijede i za isklapanje velikih struja kratkog spoja. Kod posljednjih, nestabilnosti luka dolazi u blizini (ispred ili iza) nultočke prekidne struje, pa se također mogu primijeniti Mayrove pretpostavke koje vrijede za male struje. Ipak točnije rezultate daje Hochrainerova kibernetička teorija luka, prema kojoj je vremenska konstanta luka funkcija struje luka i može se računati iz jednadžbe

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{R_{ao}} - \frac{1}{R_a} \right)}{\frac{d(1/R_a)}{dt}} \quad (28)$$

Na temelju ove jednadžbe, te jednadžbi (3) i (4) mogu se realnije ocijeniti uvjeti (22) i (23) kod kojih dolazi do nestabilnosti dinamičkog luka.

Na temelju jednadžbe (28) mogu se također računski (primjenom digitalnog računala /1/) dobiti oblici krivulja otpora dinamičkog luka i njegove vremenske konstante u okolišu intervala u kojem se vrši prekidanje luka. Iz polaznih vrijednosti U_{ao} i I_{ao} se izračunavaju na temelju jednadžbi (3) i (4) vrijednosti R_{ao} i R_a , a zatim se na temelju jednadžbe (28) dobiva τ_o . Daljnje razmatranje se vrši za trenutak Δt , koji je odabran dovoljno malen da se u tom intervalu mogu

smatrati $\mathcal{C}$ i R_a konstantnim. Nova struja luka se računa na temelju jednadžbe

$$i_a = i_k - i_d \quad , \quad (29)$$

gdje je i_k idealna trenutna struja kratkog spoja, a i_d struja deformacije koja teče u strujnom krugu uslijed napona luka (suprotno od i_k).

Vremenska konstanta luka može se dobiti još tako da se na luk na-rine poremećaj u obliku male jedinične struje Δi i promatra ekspone-nencijalni oblik vremenskog odziva napona luka, koji prelazi u no-vo stacionarno stanje uz vremensku konstantu τ .

Konačno prekidanje struje luka postiže se onda kada vremenska kon-stanta luka postane nula, tj. kada nestane rezidualna vodljivost luka, nakon čega više ne može doći do tzv. termičkog ponovnog pa-ljenja luka.

4. KVALITATIVNA ANALIZA ISPITNIH REZULTATA

Ispitivanja su izvršena na malouljnom prekidaču nazivnog napona 24 kV s induktivnom strujom 28 A /9/ i na rastavnoj sklopici 24 kV s induktivnom strujom 20 A /10/. Oba proizvoda su razvijena u Podu-zeću "Rade Končar".

Oscilogrami struje luka kod prekidača pokazuju pojavu superponira-nih titraja u dvije faze ubrzo nakon razdvajanja kontakata. To zna-či da luk postaje nestabilan već s malom duljinom i s malim otporom, što pokazuje da je vremenska konstanta luka mala. Do toga dolazi zbog intenzivnog uzdužnog hlađenja luka radi potiskivanja ulja prema gore kod kretanja kontaktnog svornika prema dolje.

Međutim, superponirani visokofrekventni titraji imaju relativnu malu amplitudu, pa ne dolazi odmah i do odreza struje. Stoga se faktori prenapona kreću do $K = 1,8$. Mali faktori prenapona su ujedno rezul-tat prigušenja uslijed gubitaka u željezu transformatora, koji dje-luju kao paralelni prigušni otpor. Trajanje luka kod ovih ispitiva-nja se kreće od 10 do 20 ms.

kod rastavne sklopke, gdje se luk gasi u zraku pomoću plinotvornih lučnih komora, trajanje luka ispitivane struje iznosi i do nekoliko perioda. Za to vrijeme dolazi više puta do nestabilnosti luka, odreza struje, prenapona, a uslijed njih i do pojava ponovnog paljenja luka. Ponovna paljenja prestaju kada se kontakti razmaknu toliko da dielektrična čvrstoća između njih dozvoli slobodno titranje energije u prekinutom strujnom krugu. Znači, ovdje ponovna paljenja sprečavaju da dođe do visokih prenapona.

Mjereni faktor prenapona kreće se do $k = 2,5$ što se smatra dozvoljenim.

5. Z A K L J U C A K

Analiza uvjeta, kod kojih dolazi do pojave nestabilnosti luka pri isklapanju malih induktivnih struja, izvršena na temelju Mayrove teorije luka i Hurwitzovih kriterija stabilnosti u skladu je s kvalitativnom analizom ispitnih rezultata. Oni pokazuju da u električnom luku u interakciji s mrežom može doći do pojave visokofrekventnih titraja koji mogu dovesti do naglog prekida (odreza) sinusoidalne struje. Daljnju kvantitativnu analizu ispitnih rezultata treba vršiti na temelju Hochrainerovog modela luka primjenom digitalnog računala.

Izvršena razmatranja se mogu primijeniti i u analizi sintetskih ispitivanja prekidača, te u analizi visokonaponskih prekidača za istosmjernu struju, jer se prekidanje istosmjernih struja može također tretirati kao rezultat superpozicije visokofrekventnih titraja na osnovnu struju.

6. L I T E R A T U R A

- /1/ Belin B.: Studij interakcije dinamičkog luka i mreže na digitalnom računalu. Elektrotehnika 5 - 1973.
- /2/ DiStefano, Stubberud, Williams: Feedback and Control Systems. McGraw - Hill, New York 1967.

- /3/ Hochrainer A.: Eine regelungstechnische Betrachtung des elektrischen Lichtbogens. ETZ-A 92(1971)4.
- /4/ Mayr O.: Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. Arch. Elektrotechn. Bd 37(1943.).
- /5/ Naumovski I.: Sklopni prenaponi u električnim sistemima s raspodijeljenim parametrima. JNK CIGRE 1972. Referat 13-03.
- /6/ Rieder W., Urbanek J.: Nouveaux aspects des recherches de l'effet du passage a zéro du courant sur les réamorçages dans les disjoncteurs. Une théorie des conditions de non - équilibre thermique des arcs. CIGRE 1966 Nr 107.
- /7/ Slamecka E.: Prüfung von Hochspannungs - Leistungsschaltern. Springer - Verlag, Berlin 1966.
- /8/ Tesla N.: Phenomena of Alternating Currents of Very High Frequency. The Electrical World, Febr. 21, 1891.
- /9/ Bericht über die Prüfung Nr 69-143. Hochleistungsprüffeld - - Běchovice 1969.
- /10/ Bericht über die Prüfung Nr 72-193. Hochleistungsprüffeld - - Běchovice 1973.

Giorgio Catenacci
Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano
Milano, Italy

ROLE OF HIGH POWER LABORATORIES IN SWITCHGEAR DEVELOPMENT

Summary

High Power Laboratories (HPL) are indispensable for the development of high power circuit-breakers. This explains why they exist despite their great cost and their relatively low utilisation.

Under the continuous technical and economical push for more powerful circuit-breakers capable of meeting more sophisticated specifications, HPLs developed new testing techniques like single phase testing, unit-testing and synthetic testing. The result of this development has been a great reduction of the cost per tested MVA and per unit of information obtained during a test. HPLs will continue for years to be an indispensable tool for the development of future breakers and, at the same time, they will greatly contribute to scientific knowledge and to its diffusion among all interested people.

1. Introduction

A high power laboratory (HPL) is a very expensive tool; it is the most expensive single test plant in a complete set of laboratories, as needed for the development of all kinds of electrical equipment.

In addition its use is relatively restricted, in comparison, for instance, to High Voltage Laboratories.

If HPLs exist, that is for two reasons:

- high capacity circuit-breakers are indispensable;
- high capacity circuit-breakers cannot be developed without suitable HPLs.

The maximum breaking capacity requested is continuously increasing and this is met by proper control of the electric arc, that is of a high

temperature plasma. This control cannot be sufficiently predicted by calculation, even if a great amount of knowledge has been accumulated in this field during the last decades. As a consequence the breaking characteristics of a circuit-breaker can be predetermined by much lower confidence than any other characteristic of any other electrical equipment: the designer must verify these characteristics during high power tests, modify the design, retest and so on.

Another difficulty peculiar to circuit-breakers is that they must operate in many different conditions, so that it is difficult to select the most critical operating conditions on which the design should be based.

The increase in some ratings (e.g., breaking current) may lead to new critical operating conditions, and the same may occur owing to some change in the principles used for arc control.

Similarly some test parameters which had no practical influence up to certain ratings and for certain designs, become very critical for higher ratings or for other designs. For example the frequency of the Transient Recovery Voltage (TRV) became important a few decades ago particularly for high-capacity air-blast circuit-breakers, whereas the Initial TRV (that is the TRV during the first microsecond after current interruption) became important only a few years ago when breaking currents of 50 kA and above were requested particularly with low arc voltage circuit-breakers.

Besides these aspects for which a HPL is indispensable to manufacturers for the development of circuit-breakers which have to meet certain specifications, a HPL is a very powerful tool also for users to reproduce special operating conditions, not already covered by present specifications, which might have caused difficulties in service or which might in future cause difficulties. From the results of such investigations, modifications are often introduced in specifications to improve them and to update them for taking care of the technological development.

2. Development of High Power Laboratories

If we consider the increase in breaking capacity occurred during the last years and foreseen for the future years and also the cost of a HPL, which increases nearly proportionally to its breaking capacity, we can easily understand why big efforts were devoted for decades for the reduction of the short-circuit power needed to test a given circuit-breaker.

The first reduction by a factor of 2 is achievable by means of single-phase testing. Despite the fact that in most cases single-phase testing is more severe than three-phase one, the said reduction is so attractive that it has influenced the design of circuit-breakers.

In effect nowadays only three single-pole breakers are used for the highest breaking capacities, instead of three-pole breakers. Another possibility to reduce HPL breaking capability is to use many breaking units in series in the same pole, that is to use unit tests.

There was a lot of discussion twenty years ago when unit testing was first introduced in IEC Recommendations for circuit-breakers, because people said that it was too difficult to properly determine the correct voltage sharing among the various breaking units in series immediately after current zero. Additionally people feared that this introduction could favor multi-unit breakers against single-unit ones.

Nowadays all most powerful circuit-breakers are multi-unit : of course this is not only due to the reduction in testing power, but also to the reduction of manufacturing cost achievable through the standardisation of breaking units to be used for a series of breakers to cover different rated voltages, and, last but not least, for the difficulty to withstand very high TRV across a single unit.

By means of unit testing HPL could increase their breaking capability during the last twenty years at a much lower rate than the corresponding increase in circuit-breaker breaking capacity, but in order to obtain this they were compelled to develop suitable methods to measure

to measure TRV across each breaking unit. Despite unit testing, the manufacturers were compelled to increase the breaking capacity of breaking units, in order to reduce the number of units in series for EHV breakers, both for reducing their cost and for increasing their mechanical reliability. Nowadays single units for 10 000 MVA single-phase are tested and 15 000 MVA units are expected to be tested in the near future. For these reasons other means are developed in HPLs to still reduce the testing power requested.

These means are in practice the synthetic methods of testing, in which two electrical supplies are connected at different times to the test breaker.

Before current-zero a full current-reduced voltage is used, whereas after current-zero a full voltage-reduced current is used. This is of course a very rough description. In practice very sophisticated methods are requested to ensure that the breaker is correctly stressed during all periods of the interruption process: arcing period, interaction period, and period of dielectric recovery.

Nowadays only synthetic methods can be used to test the most powerful breaking units, but in order to obtain this, HPLs were compelled to develop extensive research on synthetic methods and on the verification of their validity.

This last point had a very important full-out, because accurate measurements of current and voltage during the interaction period had to be developed and used, greatly contributing to the knowledge of the physical behaviour of high power arcs and therefore of circuit-breakers.

In other words by means of synthetic testing we obtain two advantages:

- to reduce test power
- to increase the information obtained during a test.

Another advantage, of lower importance, is the reduction of contact wear during non-interruptions.

In practice synthetic testing is obtained by using a conventional HPL for the supply of the full test current (current source) and an appropriate capacitor bank for the supply of the full TRV (voltage source).

This means that with the addition of this voltage source, relatively not very expensive, an existing HPL can be used to test a breaker many times more powerful than the power directly obtainable with the existing HPL alone.

The ratio between the maximum breaking capacity that can be tested by synthetic methods by a given HPL and the direct breaking capability of that HPL is called the "gain" obtainable by synthetic methods. This gain depends mainly on the arc voltage of the breaker under test. In practice this gain varies between 6 and 11, according to the type of the breaker under test. This means that the testing capability of a given HPL can be multiplied by a factor between 6 and 11, by the addition of the appropriate voltage source, that is with an additional investment around 20% of that of the existing HPL .

It is clear how important is synthetic testing as an economical solution to suit the needs for the development of always more powerful circuit-breakers. But in order to fully utilize the possibilities of synthetic testing, it is necessary that the HPL be in the condition to reproduce correctly all the test stresses to all kind of breaker and to convince all clients about the validity of the synthetic methods employed.

This last result is difficult to achieve today because there do not exist IEC Standards for Synthetic testing, but only a Guide (IEC Publication 427). In this condition another role of HPL people is to teach users about synthetic testing. This role is a very important and interesting one because, in order to teach and convince other people, one must know things very well.

In our case this means that engineers of HPLs must know quite a lot about the behaviour of power arcs, the interaction between this arc and a circuit and they must be able to measure accurately quantities to prove

the validity of such sophisticated tests (that is mainly current and voltage across each unit during a few microseconds around current zero).

Furthermore HPL people must have developed suitable synthetic methods, not only for breaking tests with a symmetrical current on a breaker without parallel opening resistors, but also

- for asymmetrical breaking tests
- for breaking tests on breakers with opening resistors
- for making tests on breakers with and without closing resistors
- for complex duty-cycles (e.g. O-O, 3s CO-3m-CO) on any kind of breaker
- for short-line-fault conditions
- for out-of-phase conditions
- etc. etc.

3. Conclusions

We have started our considerations with only economic arguments and we arrived at very sophisticated scientific knowledge. Coming back to our point, that is the role of HPLs in switchgear development, we can draw some conclusions:

1. Initially, when the breaking capacity requested was very low, it has been possible to develop very rough breakers, but sufficient for the purpose, without HPLs.

2. When the breaking capacities went up, the development of suitable breakers was possible only by means of cut-and-trials in HPLs, which had only to deliver enough short-circuit power: the result of a test was only "yes" or "no", that is the content of information of each test was very poor, the test cost per MVA was high and consequently the cost per MVA and per unit of information obtained was very high.

3. Nowadays, under the continuous technical and economical push, very powerful circuit-breakers can be developed still with the indispensable

aid of HPLs, but these laboratories are more sophisticated than before and their operators are closer to scientists than to simple technicians.

4. The cost per MVA of breaking capacity tested is now much lower than in the past and the information obtained during a test is much greater, so that the cost per MVA and per unit of information is much lower than in the past.

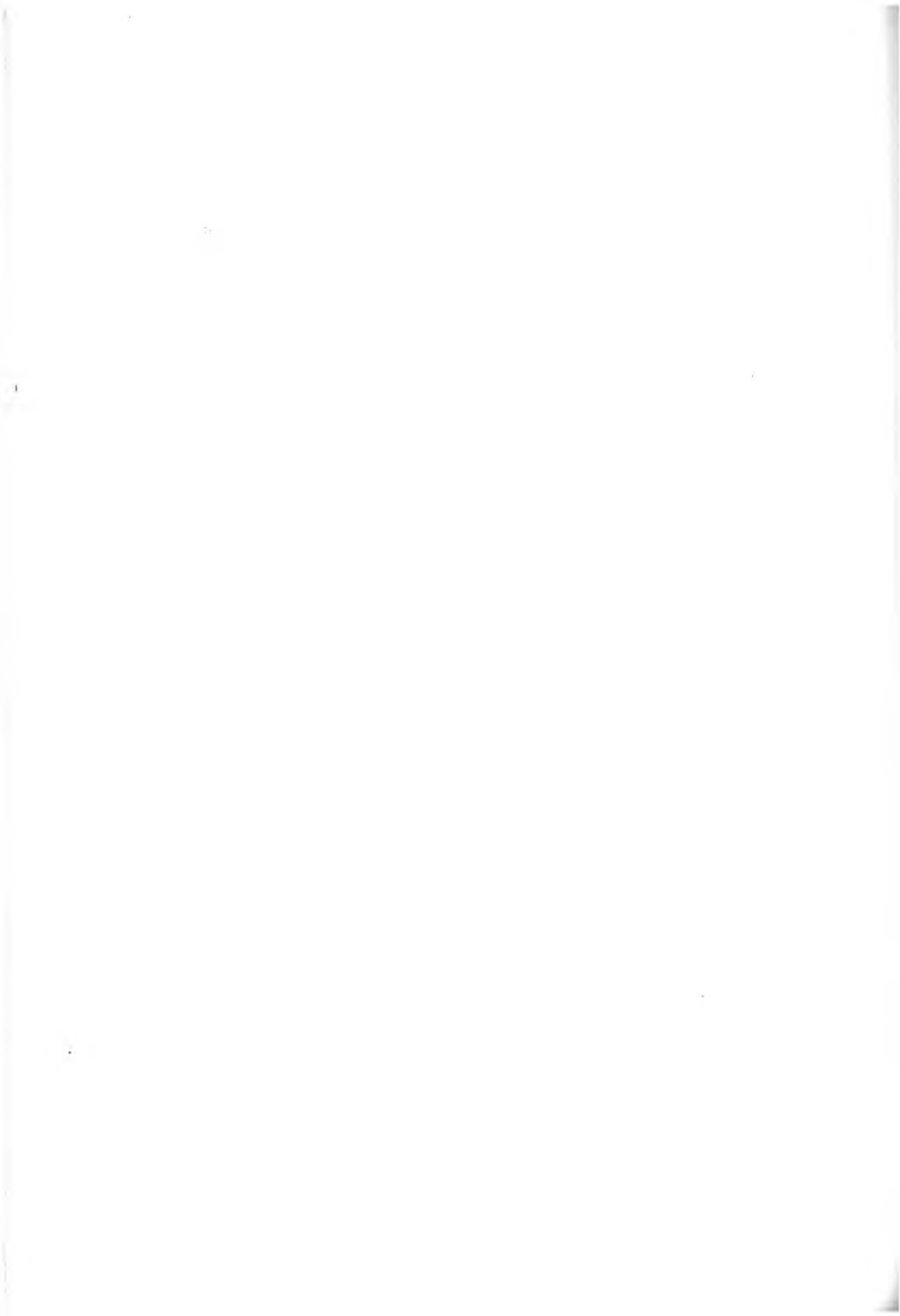
5. On the other hand the characteristics requested to a modern circuit-breaker are greater in quantity and quality than to an old one, not only in terms of MVAs, but also in terms of special performances, so that the amount of information necessary for the correct development of a circuit-breaker is bigger than in the past.

6. Taking into account that some information useful for general application is continuously accumulating and that the amount of information per test in a HPL is increasing, the number of tests in a HPL necessary to develop a new circuit-breaker is not increasing proportionally to the requests for the performance of the said breaker.

7. In the future we will probably assist to a decrease in the number of such tests, each test becoming more sophisticated and more full of information.

8. In my opinion it is not possible to foresee today when it will be possible to develop new circuit-breakers without the aid of a HPL, that is only by means of computers.

9. The role of HPLs has been, not only to develop new switch-gear, but also to develop new technicians, that is manufacturers who know more about what happens to a breaker in a network, users who know better how a breaker behaves internally and test engineers who know better both these aspects and in addition how to measure correctly very delicate phenomena.



Adil Erk
Institut für elektrische Energieanlagen
Technische Universität Braunschweig
B.R.Deutschland

THE ELECTRIC CONTACT IN POWER SWITCHING DEVICES

DER ELEKTRISCHE KONTAKT IN SCHALTGERÄTEN DER ENERGIETECHNIK

Übersicht

Die ständig steigenden Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Schaltgeräte bei gleichzeitiger Reduzierung ihrer Abmessungen führen zwangsläufig zu einer laufenden Forschungsaktivität auf dem Gebiet des elektrischen Kontaktes. Im Rahmen dieses Beitrages werden einige Ergebnisse systematischer Untersuchungen an Kontaktstücken beschrieben, deren Ziel es war, das Kontaktverhalten bei unterschiedlichen Beanspruchungen zu klären.

Einleitung

In elektrischen Schaltgeräten findet man den elektrischen Kontakt in Schraubverbindungen, in unter Federkraft stehenden festen sowie beweglichen, nicht trennbaren Kontaktstellen, in Steck- und Trennverbindungen und schliesslich in den unter Strom schaltenden Kontaktstellen. In den zuerst genannten Fällen bestehen die kontaktgebenden Teile sowohl bei Betrieb in Luft als auch unter Öl in der Regel aus Kupfer, Messing, Bronze oder Aluminium, wobei vielfach noch ein zusätzlicher galvanischer Überzug vorhanden ist. Dagegen werden unter Strom schaltende Kontaktstellen bei in Luft betriebenen Schaltgliedern mit Kontaktplättchen oder Nieten aus silberhaltigen Werkstoffen bestückt. Bei hohen Schaltleistungen werden die dem Abbrand ausgesetzten Kontaktstellen in der Regel mit Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis versehen.

Bei der grossen Zahl von Problemen und Erkenntnissen auf dem Gebiet elektrischer Kontakte kann in Rahmen dieses Vortrages nur ein kleiner Ausschnitt behandelt werden. Die folgenden Ausführungen sollen anhand einiger weniger Beispiele das unterschiedliche Verhalten elektrischer Kontakte in Schaltgeräten der Energietechnik zeigen, und zwar :

1. den Einfluss des Kontaktmaterials,
2. den Einfluss der Umgebung (Luft, Öl, SF₆, Vakuum, Isolierstoff)

Die gewählten Beispiele beschränken sich auf unter eigener Leitung durchgeführte Untersuchungen^{x/}, deren Bearbeiter zu Beginn der jeweiligen Kapitel genannt werden.

1. Verhalten silberhaltiger Kontaktwerkstoffe in chemisch aggressiver Atmosphäre

Bearbeiter: H. -J. Dräger /1/ u.

B. Dietrich /2/

Nach dem Schliessen der Kontaktglieder sollen die Kontaktstellen einen möglichst geringen Kontaktwiderstand besitzen. Das erfordert neben einer hohen elektrischen Leitfähigkeit des Kontaktwerkstoffes eine bestimmte Zahl und Grösse von stromleitenden Mikrokontaktf lächen.

Die Zahl und Grösse dieser Mikrokontaktf lächen nimmt stark ab, wenn die Kontaktstellen im geöffneten Zustand längere Zeit einer chemisch aggressiven Atmosphäre mit Schadgasen wie Schwefelwasserstoff (H₂S), Schwefeldioxid (SO₂), Chlorwasserstoff (HCl) u. dgl. ausgesetzt waren. Die entstandenen Fremdschichten müssen bei der Kontaktgabe entweder mechanisch zerstört oder, wenn sie unbeschädigt geblieben sind, durch die sog. A-Frittung elektrisch durchschlagen werden.

Bild 1 zeigt als Beispiel zunächst das Schichtwachstum auf einigen, heute in Niederspannungsschaltgeräten verwendeten Kontaktwerkstoffen auf Silberbasis. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass geringe Beimengungen zum Grundkontaktwerkstoff Silber das Schichtwachstum stark beeinflussen.

^{x/} Für die im Rahmen dieses Vortrages genannten Untersuchungen wurden vorwiegend Kontaktwerkstoffe der Firma DEGUSSA verwendet. Für die Überlassung sei an dieser Stelle gedankt.

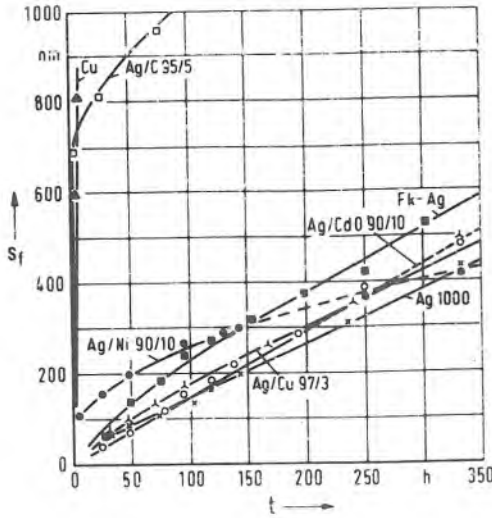


Bild 1. Fremdschichtdicke s_f auf Kontaktmaterialien der Energietechnik in Abhängigkeit von der Korrosionszeit in H_2S -haltiger Prüf-atmosphäre ($40^\circ C$, 83% rel. Luftfeuchtigkeit, 20 ppm H_2S) (nach /1/).

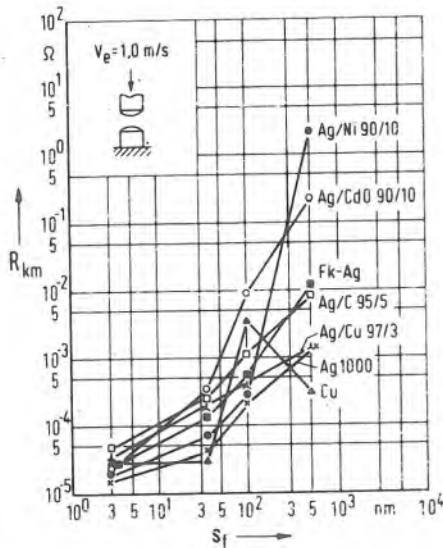


Bild 2. Kontaktwiderstand R_{km} nach dem stromlosen korrodierter Starkstrom-Abhebekontaktstücke in Abhängigkeit von der Dicke s_f der in H_2S -haltiger Prüf-atmosphäre ($40^\circ C$, 83% rel. Luftf., 20 ppm H_2S) entstehenden Fremdschichten; Kontaktkraft 55 N, Brückenmasse 55 g (nach /1/).

Was die mechanische Fremdschichtzerstörung betrifft, so geht aus Bild 2 hervor, dass die nach dem stromlosen Schliessen korrodierteter Starkstrom-Kontaktstücke auftretenden Widerstände in starkem Masse sowohl von der Dicke als auch von der Zusammensetzung der Fremdschicht abhängig sind.

Bei Strombelastung fremdschichtgestörter Kontaktstellen erfolgt eine Aufweitung der leitfähigen Mikroflächen durch die sog. B-Frittung. Dabei tritt ein Zerfall der Fremdschichten aufgrund von Diffusions- und Ionenleitvorgängen infolge erhöhter Kontaktstellentemperatur und Feldbeanspruchung auf, wodurch der Kontaktwiderstand irreversibel verringert wird. Je höher die Beweglichkeit der Ionen in der Fremdschicht ist, um so eher und schneller geht der Zerfall vonstatten.

2. Verhalten dauerbelasteter Kontaktstücke in Öl und Luft

Bearbeiter: K. Lemelson /3/ u.

H.-J. Dräger /1/

Beträchtliche Kontaktwiderstandserhöhungen können auch auftreten, wenn anfänglich saubere Kontaktstücke mit sehr vielen und gleichmässig verteilten Mikropunkten unter ungünstigen äusseren Bedingungen betrieben und zwischenzeitlich nicht betätigt werden.

Im Bild 3 sind als Beispiel zwei Kontaktwiderstandskurven in Abhängigkeit von der Betriebszeit dargestellt, und zwar von einer Kontaktstelle Cu/Ms 58 unter Öl - wie sie beispielsweise in Trans-

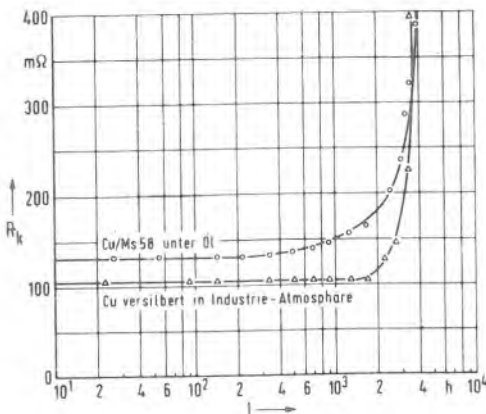


Bild 3.

Kontaktwiderstand geschlossener Kontaktstellen unter Isolieröl (nach /3/): Kontaktwerkstoff Cu/Ms 58, Belastungsstrom $I_{\text{eff}}=200$ A, Öltemperatur: 80°C , in H_2S -haltiger Industrie-Atmosphäre (nach /1/):

Kontaktwerkstoff Cu versilbert, Belastungsstrom $I_{\text{eff}} = 150$ A, Kontaktkraft 25 N.

formatorumschaltern vorhanden ist - sowie von einer Kontaktstelle Cu versilbert in einer H_2S -haltigen Kunstfaser-Produktionshalle. Charakteristisch für das Betriebsverhalten dieser Kontaktstellen ist der plötzliche Anstieg des Widerstandes nach einigen tausend Stunden.

Der Grund für dieses Kontaktversagen dürfte darin zu suchen sein, dass die anfängliche Zahl und Grösse der wirk-samen Mikroflächen durch die sich bildenden Fremdschichten und die unter Öl hoher Temperatur zusätzlich entstehenden Ablagerungen stark verringert wird. Durch die damit verbundene Erhöhung der Kontakttemperatur beschleunigt sich dieser Prozess zwangsläufig, wodurch es zu dem beobachteten Kontaktversagen kommt. Durch Verwendung geeigneter Kontaktwerkstoffe, Erhöhung der Kontaktkraft, Reduzierung von strommässiger Belastung und Umgebungstemperatur wird der Zeitpunkt des Versagens verzögert. Durch häufiges Betätigen der Kontaktstellen kann ihr Versagen ganz vermieden werden.

3. Kontaktwiderstandsverhalten in gekapselten Isolierstoffkammern

Bearbeiter: V. Neumeyer /4/

In wenig belüfteten Isolierstoffkammern können durch häufiges Schalten und durch Verwendung ungeeigneter Isolierstoffe zum Teil erhebliche Kontaktwiderstandserhöhungen auftreten. Die Ursache ist darin zu sehen, dass die durch den Schaltlichtbogen entstehenden Zersetzungsprodukte der Luft mit dem Kontaktwerkstoff zu Silbernitrat reagieren. Darüber hinaus können weitere Fremdschichten auf den Kontaktstücken entstehen, wenn der Schaltlichtbogen die begrenzenden Isolierstoffe berührt und wenn sich bei der damit verbundenen Zersetzung der Thermoplaste reaktionsfähige Gase bilden.

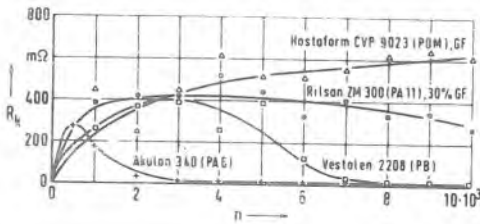


Bild 4.

Typische Widerstandsverläufe als Funktion der Schaltspielzahl n bei Einwirkung des Schaltlichtbogens auf die Kammerwände. Parameter: Kammerwandmaterial (Thermoplaste). Lastkreis: 10 A, 240 V, Lichtbogenbrenndauer: 22 ms, Kontaktwerkstoff: Ag/Cu 97/3, (nach /4/).

Bild 4 zeigt am Beispiel von Ag/Cu 97/3-Kontaktstellen den Einfluss verschiedener Thermoplaste auf den Kontaktwiderstand als Funktion der Schaltzahl. Kennzeichnend ist die Tatsache, dass der Kontaktwiderstand bei jedem Material zunächst ansteigt. Ungeeignete Isolierstoffe verursachen stetige Widerstandserhöhungen, bei brauchbaren Kunststoffen erreicht der Kontaktwiderstand dagegen nach einer bestimmten Zahl von Schaltungen ein Maximum und sinkt anschliessend wieder auf niedrige Werte ab.

Durch luftdichte Kapselung der Kontaktstellen kann unter Verwendung geeigneter Isolierstoffe die Silbernitratbildung auf den Kontaktwerkstoffen verhindert und der Einsatz unedler Kontaktwerkstoffe ermöglicht werden.

4. Abbrand von Kupfer-Kontaktstücken in verschiedenen Medien

Bearbeiter: J.H.Kaminski /5/, D.Althoff /6/,
Abdelasis /7/

Der an die Kontaktstücke abgegebene Anteil der beim Abschaltvorgang freiwerdenden Lichtbogenenergie kann sehr unterschiedlich sein. Er hängt bekanntlich unter anderem von der Grösse des Abschaltstromes, dem Schaltmedium, der Polarität und Grösse der Schaltstückpartner, von der Richtung und Intensität der auftretenden Plasmastrahlen sowie von der Verweildauer der Lichtbogenfusspunkte auf den Kontaktstücken ab. Ein Teil der den Kontaktstücken zugeführten Energie wird durch Wärmeleitung abgeführt; durch den Rest wird der Kontaktwerkstoff erhitzt, zum Schmelzen und Sieden gebracht. Massgebend für den Materialverschleiss ist demnach sowohl die an die Kontaktstücke abgegebene Energie als auch die Abbrandfestigkeit des Werkstoffes.

Der Einfluss des Schaltmediums soll am Beispiel zylindrischer Kontaktstücke aus Elektrolytkupfer aufgezeigt werden. Wie

aus Bild 5 hervorgeht, ergeben sich unter etwa gleichen Versuchsbedingungen für $\hat{I} > 4$ kA beim Abbrand in Luft. SF_6 und Öl erhebliche Unterschiede. Es ist ferner festzustellen, dass der Abbrand in diesen Medien um eine Grössenordnung höher ist als im Hochvakuum (10^{-7} Torr). Ein besonders grosser Abbrand tritt immer dann auf, wenn sich das Material nicht erst im dampfförmigen, sondern

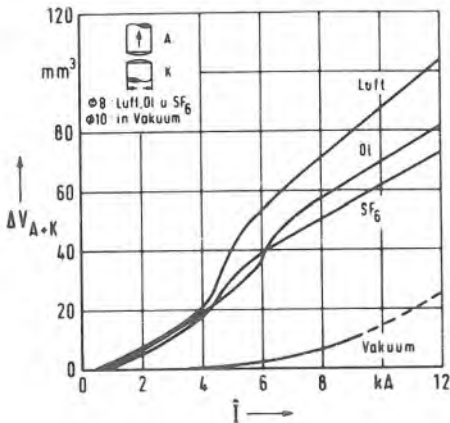


Bild 5.
Summenabbrandvolumen ΔV_{A+K} zentrisch angeordneter gleichgrosser Kontaktstücke aus E-Kupfer in Abhängigkeit von Ausschaltstrom $\hat{I}$ (1 Stromhalbwelle 50 Hz) in unterschiedlichen Schaltmedien, (SF_6 : nach /5/, Vakuum: nach /6/, Öl: nach /7/).

bereits im schmelzflüssigen Zustand von den Kontaktstücken löst. Das erfolgt insbesondere bei Stromstärken, bei denen die gesamte Stirnfläche der Kontaktstücke aufgeschmolzen wird (wie z.B. bei 4, 5 kA in Luft und 6 kA in Öl).

5. Abbrand von Kupfer-Elektroden in Abhängigkeit von den Grössenverhältnissen der Kontaktpartner

Bearbeiter: Abdel-Asis /7/

Bei unterschiedlich grossen Kupfer-Elektroden- wie z.B. in der Anordnung Kontaktstulpe/Schaltstift - muss beachtet werden, dass sich der Abbrand anders als bei gleich grossen Kontaktstücken verhält. Die Bilder 6a - d zeigen die Abbrandvolumina ΔV_A und ΔV_K der jeweiligen Anoden bzw. Katoden in Abhängigkeit vom Kontaktstück-Durchmesser bei Schaltungen unter Öl und Luft (Anode bewegt, Katode feststehend).

Aus den dargestellten Kurven ist deutlich ersichtlich, dass die Elektroden mit dem grösseren Durchmesser beim Überschreiten einer gewissen, von der Durchmesserdifferenz abhängigen Stromstärke wesentlich stärker abbrennen als diejenigen mit dem klei-

neren Durchmesser. Dies ist unabhängig von der Polarität der Elektroden und unabhängig davon, ob das bewegliche oder feststehende Kontaktstück das kleinere ist. Der geringste Summenabbrand ergibt sich bei etwa gleich grossen Kontaktpartnern.

Der Grund für den erhöhten Materialverschleiss der grösseren Elektrode sind intensive, von der Stirnfläche des Gegenkontaktstückes ausgehende Plasmastrahlen, die beim Aufprall auf die grössere Elektrode das dort aufgeschmolzene Material im flüssigen Zustand wegblasen. Die Plasmaströmung wird besonders stark bei Stromstärken, bei denen die Lichtbogenfusspunkte die gesamte Stirnfläche des kleineren Kontaktstückes beanspruchen.

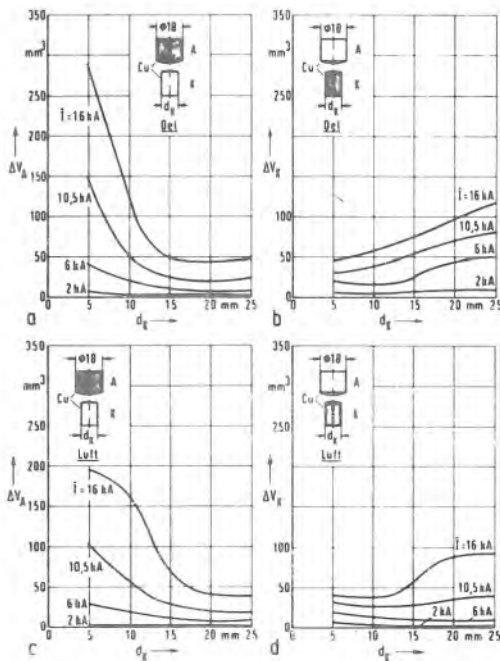


Bild 6.

Abbrandvolumina ΔV_A und ΔV_K der jeweiligen Anoden bzw. Katoden in Abhängigkeit vom Kontaktstück-Durchmesser bei Schaltungen unter Öl und Luft (nach /7/).

6. Abbrandverhalten von Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis in Abhängigkeit von der Schaltzahl und vom Herstellungsverfahren

Bearbeiter: M.Magnusson /8/

Im Gegensatz zu den im Kap.5 beschriebenen Versuchsergebnissen bei Kupfer ist bei den Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis kein ausgeprägter Einfluss des Grössenverhältnisses der Kontaktpartner auf den Abbrand vorhanden. Stattdessen ist der Materialver-

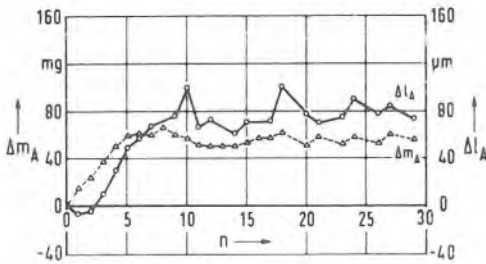


Bild 7.

Abbrand Δm_A und Längenabnahme Δl_A der Anode in Abhängigkeit von der Schaltzahl n bei Schaltungen in Luft mit 6 kA Strom. Werkstoff: W/Cu 80/20 % - Tränkwerkstoff (nach /8/).

schleiss dieser Verbundwerkstoffe in starkem Masse von der Schaltzahl und vom Herstellungsverfahren abhängig.

Der Einfluss der Schaltzahl bei Schaltungen in Luft soll am Beispiel des Massenabbrandes Δm_A der Anode eines W/Cu 80/20% - Tränkwerkstoffes dargestellt werden. Wie aus Bild 7 hervorget, weisen beide Kurven in der Anfangsphase eine Tendenz auf, was sowohl auf die zunächst ständig zunehmende Kupferverarmung der Kontakttrandzone als auch auf die damit verbundene Auflockerung des Werkstoffgefüges zurückzuführen ist. Der schliesslich etwa konstante Abbrand und die annähernd gleichbleibende Längenänderung pro Ausschaltung werden dadurch verursacht, dass beide Gefügekomponenten des Werkstoffes in diesem Schaltbereich in einem dem Mengenverhältnis des Grundgefüges entsprechenden Anteil abgebaut werden. Bei einer Klassifizierung der Kontaktwerkstoffe muss die Schaltzahlabhängigkeit des Materialverschleisses, die übrigens auch bei Schaltungen unter Öl auftritt, berücksichtigt werden.

Der Einfluss des Herstellungsverfahrens ist aus den im Bild 8 dargestellten Summenabbrandkurven von zwei Sinterwerkstoffen und zwei nach dem Tränkverfahren hergestellten W/Cu 80/20%- Werkstoffen bei Schaltungen unter Öl zu ersehen. Der vergleichsweise grosse Abbrand der Sinterwerkstoffe ist darauf zurückzuführen, dass sich das Material infolge des Fehlens eines festen Wolframgerüsts in stärkerem Masse im schmelzflüssigen Zustand ablöst. Bei den Tränkwerkstoffen, wo ein festes Wolframgerüst vorhanden ist, erfolgt der Materialverlust dagegen grösstenteils in dampfförmiger Form und ist demzufolge geringer als bei den Sinterwerkstoffen. Die Abweichungen im Abbrandverhalten der beiden

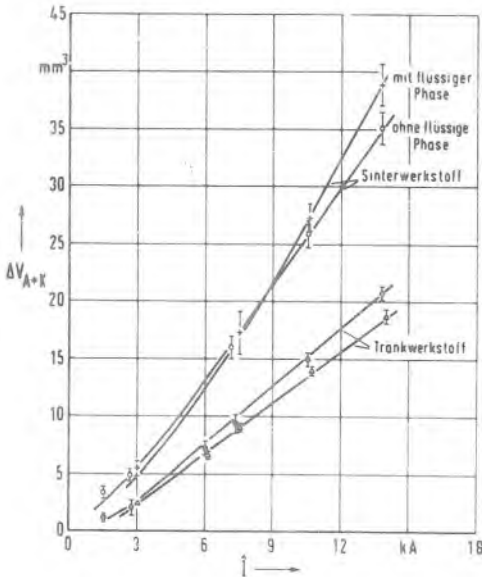


Bild 8.
Volumenmässiger Summenabbrand ΔV_{A+K} pro Ausschaltung in Abhängigkeit vom Strom-Scheitelpunkt I für unterschiedlich hergestellte W/Cu 80/20% - Verbundwerkstoffe bei Schaltungen unter Öl (nach /8/).

Sinterwerkstoffe untereinander basieren auf unterschiedlichen Sinterertemperaturen. Bei den Tränkwerkstoffen sind unterschiedliche Kupferbeimengungen bei der Herstellung des Wolframgerüsts für das differenzierte Verhalten verantwortlich.

7. Verweilzeit von Lichtbogenfusspunkten auf Kontaktstücken

Bearbeiter: M.Lindmayer /9/, K.-H.Schröder /10/,
N.Behrens /11/

Bei Niederspannungsschaltgeräten mit Löschblechkammern muss der Lichtbogen nach Trennung der Kontaktstücke durch magnetische

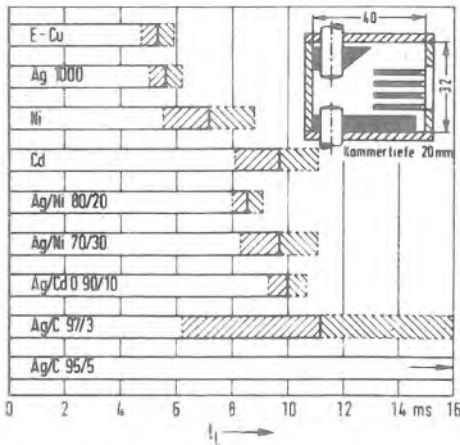


Bild 9.
Lichtbogenverweilzeit t_L bei unterschiedlichen Kontaktwerkstoffen und einem Belastungsstrom von $I_{eff} = 5$ kA (nach /9/).

Felder von den teuren Kontaktwerkstoffen auf Abbrandstücke aus billigerem bzw. abbrandfestem Material in Richtung der Löscheinrichtung abgelenkt werden. Um eine Löschung des Lichtbogens möglichst in der ersten Stromhalbwelle zu ermöglichen, darf die Lichtbogenverweilzeit t_L^x einen Wert von einigen Millisekunden nicht überschreiten. Bei strombegrenzenden Schaltern muss sogar $t_L < 1$ ms erfüllt sein. Bestimmt wird die Verweilzeit im wesentlichen vom Kontaktmaterial, der magnetischen Blasung und der Stromstärke.

Was den Einfluss des Kontaktwerkstoffes betrifft, so ist aus Bild 9 zu entnehmen, dass die in der Schaltgerätetechnik aufgrund geringer Schweisneigung besonders häufig verwendeten Materialien wie Ag/CdO und Ag/C die grössten Lichtbogenverweilzeiten verursachen /9/. Dies ist darauf zurückzuführen, dass

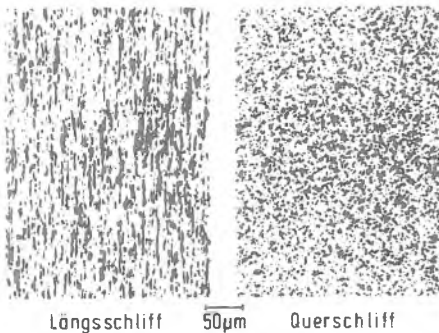


Bild 10.

Gefügebild eines modernen Verbundwerkstoffes aus Ag/C 97/3 (pulverm., stranggepresst) mit senkrecht zur Schaltfläche ausgebildeten Graphitfasern (Hersteller: Degussa).

heterogene Werkstoffe aus Komponenten, die sehr unterschiedliche Siedetemperaturen aufweisen, einen starken "Stabilisierungseffekt" besitzen /10/ und dass ausserdem bei Verbundwerkstoffen schwer auslenkbare Plasmastrahlen entstehen /9/.

Die Verweilzeiten lassen sich durch Erhöhung der magnetischen Blasfeldstärke sowie durch Verwendung unsymmetrischer Werkstoffpaarungen /11/ oder silberhaltiger Verbundmaterialien mit Cadmiumoxid- oder Graphitfasern reduzieren, deren Gefüge aus Bild 10 zu ersehen ist.

Zusammenfassung

Die dargestellten Ergebnisse einiger grundsätzlicher Untersuchungen lassen das unterschiedliche Verhalten elektrischer

^{x/} Sie ist definiert als die Zeit zwischen dem Beginn der Kontakttrennung und dem Wegwandern des Lichtbogens von den Kontaktstücken.

Kontakte in Schaltgeräten der Energietechnik deutlich erkennen, und zwar zeigt sich sowohl beim Kontaktwiderstand als auch beim Materialverschleiss ein starker Einfluss des umgebenden Mediums sowie der Beanspruchungsart. Auf die physikalischen Zusammenhänge wurde dabei nur insoweit eingegangen, als es zum unmittelbaren Verständnis der hier dargestellten Phänomene erforderlich war. Weitergehende physikalische Erklärungen sind in den jeweiligen Kapiteln genannten Literaturstellen zu entnehmen.

Neben einer einwandfreien Konstruktion und der optimalen Bemessung der Kontaktkraft ist also für die volle Funktionsfähigkeit eines Schaltgerätes vor allem die richtige Wahl des Kontaktwerkstoffes entscheidend. Bei gleichen Gerätedaten kann die Festlegung des geeigneten Kontaktwerkstoffes - abhängig von der Form der Schaltglieder und der Wirkungsweise des Lichtbogenlöschsystems - sehr unterschiedlich ausfallen. Falls eigene Erfahrungen fehlen, ist es deshalb zweckmässig, sich zu Beginn einer Neukonstruktion von erfahrenen Schaltgerätespezialisten der Kontaktwerkstoffhersteller, die die Möglichkeit haben, in ihren Labors Kontaktwerkstoffe unter praxisnahen Bedingungen zu testen, beraten zu lassen.

Schrifttum

- /1/ Dräger, H.-J.: Fremdschichtbehaftete Starkstromkontaktstücke. Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben Er 21/51/56/62 an die DFG, Inst. f. el. Energieanlagen, TU Braunschweig
- /2/ Dietrich, B.: Über die Frittung von Fremdschichten in ruhenden elektrischen Kontakten. Dissertation TU Braunschweig, 1973
- /3/ Lemelson, K.: Beitrag zur Klärung des Verhaltens geschlossener Starkstromkontaktstellen unter Isolieröl im Dauerbetrieb. Dissertation TU Braunschweig, 1973
- /4/ Neumeyer, V.: Lichtbogen und Isolierstoffe. Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben Er 21/47/54/58 an die DFG, Inst. f. el. Energieanlagen, TU Braunschweig
- /5/ Kaminski, J.H.: Kontaktverhalten in SF₆. Zwischenbericht über das Forschungsvorhaben Er 21/52/64 an die DFG, Inst. f. el. Energieanlagen, TU Braunschweig
- /6/ Althoff, D.: Über die Elektrodenerosion beim Schalten grosser Wechselströme im Hochvakuum. Dissertation TU Braunschweig, 1970
- /7/ Abdel-Asis, A.M.: Auswirkung des Schaltlichtbogens auf Kupfer-Kontaktstücke und Schalterflüssigkeiten beim Ausschalten von Wechselströmen von 1 bis 18 kA. Dissertation TU Braunschweig, 1972
- /8/ Magnusson, M.: Über das Abbrandverhalten von Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis bei dem Schalten grosser Wechselströme in Luft und Öl. Forschungsarbeit TU Braunschweig (wird demnächst veröffentlicht)
- /9/ Lindmayer, M.: Über die Vorgänge der Lichtbogenlöschung in kompakten Löschblechkammern bei Wechselströmen zwischen 2, 5 und 8,5 kA. Dissertation TU Braunschweig, 1972
- /10/ Schröder, K. -H.: Das Abbrandverhalten öffnender Kontaktstücke bei Beanspruchung durch magnetisch abgelenkte Starkstromlichtbögen. Dissertation TU Braunschweig, 1967
- /11/ Behrens, N.: Lichtbogenverweilzeiten. Zwischenbericht über das Forschungsvorhaben Er 21/66 an die DFG, Inst. f. el. Energieanlagen, TU Braunschweig

Prof.Dr.phil. W. Rieder
Technische Universität Wien

ACTUAL CIRCUIT-BREAKER ARC RESEARCH

In my character of the chairman of the Current Zero Club I have the pleasure to express the warmest wishes of this international group of circuit-breaker arc experts for a successful meeting. I thank the president of the Yugoslav Academy of Science and Arts for his honourable invitation to present a paper on actual circuit-breaker research a good part of which was carried out by the members of our club. My time allotted by the organizer reveals that I am not expected to discuss certain results of individual authors in detail, but to give an over-all survey on the actual fields of research. Table I gives a systematic synopsis of the main items of the present activities in circuit-breaker arc research.

During the past decade not only the high-pressure circuit-breaker development forced both physicists and electrical engineers to most interesting arc investigations at atmospheric and higher pressures, but also the new-coming vacuum breakers brought most fascinating problems discussed in a great number of publications.

The high-pressure arc research is dealing with two main groups of problems occurring in circuit-breakers:

The one concerns the electrode phenomena as

- electrode erosion in the various arcing media air, oil, and SF_6
- contact welding caused by the arc at make
- short arc reignition which governs not only single and double break low-voltage switches, but also medium-voltage magnet-blast breakers, as far as they use arc splitters
- arc root mobility which is of main interest for magnet-blast breaker development and essentially related to arc erosion.

Today these electrode problems will be treated in more detail by Prof. Erk in his paper on electrical contact phenomena.

The other group of high-pressure arc problems concern the arc column phenomena. These need investigations on both the problems of the arcing media, i.e., the phenomena related to the matter the arc consists of, and the boundary conditions of the arc, i.e., its interactions with the electric circuit on the one hand (which provides the arc power input) and the interrupter on the other hand (which influences the arc power losses). It must be emphasized that both power input and power losses are not simply determined by the circuit and by the interrupter, resp., but the arc power balance is governed by most complex interactions of both circuit and interrupter with the arc.

The classical switching media, air and oil, are by no means out of business. Despite of the increasing production of SF_6 and vacuum breakers the majority of breakers still use air and oil as switching media and it seems that this fact encourages some laboratories to start new projects on oil and air interrupter research. Of course, the less conventional media SF_6 and vacuum needed much more research for their early development and attracted many investigators.

During the fifties the first promising SF_6 -breakers were developed without any detailed knowledge about the reasons for the surprising and successful behaviour of this switching medium (as it ever happened to be in the history of circuit-breaking). But after the first enlightening publication by Frind (1960) a great number of papers (most of them written by CZC members) discovered the mystery successively, and the essential mechanisms are understood now (Rieder 1970, Frost 1971, Lowke 1971, Hertz 1971, Perkins 1971 ... 1974b, Swanson 1971 ... 1972, Frind 1974, Airey 1975).

Nevertheless, SF_6 continues to challenge both physicists and engineers in two ways: on the one hand there are the fascinating and unique problems of arcs in liquid or in super-critical SF_6 interrupters (Garzon 1976); on the other hand the question perpetuates whether equivalent or even better switching media might exist. Fortunately, today SF_6 problems will be treated by an expert in a special paper in more detail, and I may continue with the remaining subjects.

Recently not only the pure switching media have been considered, but also the influence of the electrode vapour on the arc column behaviour has been taken into consideration (Airey 1976).

Different methods must be applied to investigate the interactions of the switching arc either with its feeding circuit (to be interrupted) or with the interrupter increasing the arc losses.

The investigations on the interaction arc - circuit should yield a method (as simple as possible) to predict the behaviour of a certain breaker (which might be considered as a black box) in any circuit of interest on the basis of a minimum knowledge, i.e., a minimum number of tests needed to gain the necessary information about the characteristics of the breaker. This method has to satisfy the sales engineer and the user of a breaker who want to know under which conditions the breaker will interrupt or fail. This method has also to satisfy the test engineer who needs to give all the information wanted with the aid of a minimum number of figures: it is the problem of acceptance testing and of making test specifications. Beyond that, for circuit-breaker development the method should indicate, in which way the behaviour of the breaker was altered by any variation of its design parameters, and a certain physical interpretation of the breaker's characteristic figures should aid further development; this requirement needs a certain transparency and simplicity.

The first rather successful attempts in this direction were made by Cassie (1939) and Mayr (1943), independently, when they published their dynamic arc equations. Both grand old men of the Current Zero Club celebrated their 70th birthday a few years ago. In 1955 T.E. Browne, Jr. showed the common root of both equations and tried a first combination of both ways. A second approach was made by Cassie and Mason 1956. After the current zero measuring technique had been developed to an appropriate level (Rieder 60, Cassie 64) both the unexpected efficiency, but also the limits of this ingeniously simple statement was fully discovered.

Rieder and Urbanek (1966) extended the Mayr equation to include the thermal non-equilibrium reignition conditions which appear especially in short

line fault interruption, and later Urbanek (1972, 1974) tried to include the early dielectric reignition too. These mathematical arc models mentioned describe the arc with the aid of two (Cassie, Mayr), three (Rieder-Urbaneck), or four (Urbanek) physically meaningful (transparent) constants characterizing power loss, arc voltage, thermal inertia, and dielectric strength.

These constants may be evaluated from any qualified current zero oscillogram; the differential equation of the arc combined with that of any circuit allows to calculate the interrupting behaviour of the breaker under given conditions. The late Prof. Hochrainer who was the first chairman of the CZC tried to use two empirical functions instead of constants to describe the characteristics of an individual type of breaker (1970...1972), and a number of authors followed this way (Grütz 1971, Schwarz 71, 72, Brakelmann 1974, Rijanto 74), which yields a more adaptable, perhaps less transparent arc model, but needs some more experimental and computing effort. Presumably it depends on the actual aim to decide which way should be preferred. At present at my Institute Mr. Blahous tries to extend the Urbanek model also to late dielectric reignitions.

This short survey may characterize the efforts to understand the arc - circuit interaction; an expert will give more detailed information about arc models in a special paper today.

Another problem is the mathematical description of the interaction of the arc with the breaker. This might concern either magnet-blast breakers, where the arc is moved in a stationary medium and later pressed either against arc splitters or insulating surfaces; or it might concern nozzle breakers, where a still arc is exposed to a flowing ambient; in gas-blast breakers the arc is situated in the axis of a supersonic nozzle, in oil breakers more complicated labyrinths are in use.

Various information are wanted about the magnetically driven arc (its velocity, lengthening, voltage gradient and reignition voltage). More than a hundred papers have been published on the arc motion in a transverse magnetic field at atmospheric pressure. (Not to speak about the many papers dealing with the cross flow arc and the most fascinating investigations about

retrograde arc motion at reduced pressures, obviously stimulated by difficulties of magnet-blast interrupters in aircraft at high altitudes.)

The arc motion is governed by both electrode and column effects and therefore - despite of current and magnetic field strength - it depends on a great number of parameters as electrode distance, material and surface conditions, arc runner shape and configuration, arc chute wall distance, material and surface conditions, air flow conditions, etc.

Recently some more papers have been published on magnet-blast arcs demonstrating that these phenomena are by no means yet explored: Guile and Slood (1975) demonstrated peculiar irregularities ("low velocity mode arcs") at higher currents (kA) and pressures. Sudhölter (1974, 1975) showed that extremely high current arcs (up to 90 kA) may become completely immobile under certain conditions. Burkhard (1974) revealed a significant dependence of the arc root velocity on the surface roughness of the electrodes, while Lindmayer (1972, 1973) demonstrated the influence of the arc chute walls. Amft (1970, 1971) emphasized that at low arc velocities statistical investigations are needed. Arc splitting by deion plates was studied by Gassmann (1968) and Lindmayer (1973). Doubtless under various circumstances considered the arc behaviour is essentially influenced by plasma jets originating at the arc roots (Burkhard 1970, Amft 1970, Lindmayer 1973a, Guile 1975).

Arc lengthening between divergent arc runners is limited by "retrogression", i.e., due to dielectric breakdowns at a shorter distance between the horns in the rear of the arc, followed by current commutation to the new discharge channel (Walter 1967, Heinrich 1970).

Experimental investigations of high velocity blown arcs led to the fundamental question whether the matter of the arc column is moved in the field or the state of high temperature propagates through a still gas (Maecker, 1971). Obviously both mechanisms are effective.

Many authors measured the arc voltage of magnetically blown arcs under various conditions (recently, e.g., Walter 1967, Harry 1968, Guile

1969, Sudhölter 1974), but no approach has been made to establish a generally valid theory.

A great number of papers still deal with short a.c. arc reignition which is dominated by the electrodes (e.g., Schmelzle 1970, Krajinić 1971, Kolacinski 1973, Bartosik 1973, Perkins 1974a).

Especially multiple interruption was studied by Studtmann (1969) and Lindmayer (1970, 1973b, c); Lindmayer (1970, 1973b,c) and Loh (1971) considered the influence of both the material of the electrodes and that of the arc chute walls. No information was found about the dependence of the reignition voltage on the magnetic field since Rieder (1959) and Auleytner (1964).

The reignition of a.c. arcs adjacent to refractory surfaces was investigated by T.E. Browne (1951) first, later by Frind (1965) who published a theory on the time constant of flat arc columns between narrow insulating walls which was proportional to the square of the plate distance and inversely proportional to the thermal diffusivity of the plasma. Frind (1971) correlated both wall temperature and electrical conductivity of the gap.

Parvenov (1966) investigated the influence of thermally prestressed insulating surfaces on the reignition of stationary adjacent arcs. Keitel (1969) derived a dynamic arc theory of the long arc in narrow gaps between insulating walls based on an adapted power balance equation.

While no further attempt has been made to calculate the dynamic behaviour of arcs in magnet-blast breakers, a very great number of papers have been published on nozzle flow arcs during the last decade.

The temperature field, the flow field, and the electrical field in arc nozzles have been studied in detail, both experimentally and theoretically, to understand the phenomena upstream, around and downstream the vena contracta at any time, i.e., during the high current, the current zero (interaction), and the high voltage time interval.

It became obvious during the high current regime the temperature profile of the arc to be nearly rectangular (and the current density to be constant) due to the effective u.v. radiation power transport inside the column,

but the radiative losses of the arc into its surroundings to be negligible (Lowke 1971, Perkins 1971, Hermann 1974a), though under certain conditions radiation losses seem to be important (Swanson 1971a, Strachan 1975). Turbulence losses are dominating especially in the downstream region and after current zero (Hertz 1971, Kopplin 1971, Lebedew 1971, Swanson 1971a, Thiel 1971, Hochrainer 1972, Niemeyer 1973, Andriessen 1974, Hermann 1974b, Airey 1975)

Detailed theoretical models based on the laws of conservation of energy, impulse, mass and charge have been developed regarding both plasma and gas flow theories (Frost 1971, Ragaller 1971, Swanson 1971a, Hermann 1974a, b, Andriessen 1974).

Such systems of differential equations give more detailed insight into the influence of numerous parameters of the interrupter design and of the gas peculiarities on the arc behaviour and allow to study the interaction of the arc with the gas flow and its boundaries along the nozzle. The final aim is to design more sophisticated interrupters and - in the ideal case - to calculate the parameters of the interrupter according to its duty or, vice versa, to calculate the breaking capacity of the breaker from the design parameters. (This is a completely different aspect than that of the user of the breaker who does not look into the breaker and is not willing to trust in complicated theories of nonisentropic supersonic plasma flow, but wants to know the applicability of the breaker in certain points of his network after a few tests.)

The nozzle flow arc models usually assume an axial cold gas flow surrounding the arc inside the nozzle. But if the vena contracta of the nozzle is completely filled by the arc, the cold gas flow is suppressed and the boundary conditions are severely changed. This phenomenon of nozzle clogging corresponds to an absolute current limit of the breaker - independent of the actual voltage stress; it has been studied too by a number of authors successfully with the aid of much simpler assumptions (Pratl 1970, Kopplin 1971, Perkins 1971, 1972b, 1974b, Airey 1972).

The labyrinths used in oil interrupters are much more complicated than a supersonic nozzle and the pressure conditions are far less defined. No comparable efforts have been made to investigate these problems. In Vienna we tried to start in this field; the problem was limited to the applicability of no-load characteristics with regard to small capacitive current interruption and will be published soon.

The first attempt of vacuum interruption by Soerensen (1923) failed due to lack of high vacuum technology. After World War II vacuum switches were developed more successfully for limited applications. About 15 years ago - after a long research and development phase (Cobine 1963, Reece 1963) - power vacuum interrupters appeared on the market. Since then a great number of papers were published on vacuum arc physics with special regard to the difficulties and problems which arose in vacuum interrupters:

- cathode instabilities at low currents causing current chopping and consequently switching overvoltages
- anode instabilities at high currents causing strong evaporation and consequently severe electrode erosion and failure to interrupt.

The vacuum arc mechanism was rather obscured than enlightened, when ions were detected in vacuum arcs having energies corresponding to potentials considerably greater than the anode potentials (Davis 1969); but an illustrative vacuum arc model was established by Kimblin (1969, 1971) and Mitchell (1970) explaining all experimental results in the low and high current region.

The cathode surface evaporates due to the high current density of the multiple cathode spots (one per about 150 A). In front of them a high density vapour volume is built emitting randomly distributed, fast neutral and ionized metal atoms against the anode and the chamber walls. Field emission electrons ionize the vapour cloud near the cathode which gains electric potential much more positive than the anode which just collects the electrons, ions and atoms arriving in a diffuse quasineutral column which neither suffers losses due to particle collisions nor needs a voltage gradient.

The arc voltage is about some 20 V (depending on the cathode material) at low currents. With increasing current the cathode vapour density increases and an increasing voltage gradient appears along the column. At still higher current values (depending on both electrode distance and size) an anode spot is formed, an anode voltage drop appears, and suddenly the anode evaporates vehemently. Then no longer the arc must be regarded as a vacuum arc (Ecker 1974, Kimblin 1974, Mitchell 1974).

A most interesting method was applied by Ecker (1973) to find the area of existence of cathode spots; he was able to show theoretically the reason for both current chopping and cathode spot splitting.

Since there is no time available to discuss actual vacuum arc research in more detail, I may refer to two most excellent survey papers published by Selzer (1971) and Farrall (1973).

The dielectric behaviour of vacuum contacts seems to be rather peculiar, depending on their prestresses. Though voluminous literature is available on vacuum breakdown, very little has been published on these special but rather important effects (Farrall 1975). At the University of Liverpool and now also in Vienna some experimental investigations on the dielectric strength of variously prestressed vacuum contacts are running.

Bibliography

- D.R.Airey, P.H.Richards, J.D.Swift: Time-resolved radial temperature profiles for 10 kA SF₆ arcs. J.Phys. D 8 (1975) 1982-93
- D.R.Airey et al.: Electrode vapour effects in high current gas blast switchgear arcs. IEEE Trans. PAS-95 (1976) 1-13
- D.Amft: Die Lichtbogenwanderung mit geringen Geschwindigkeiten und im Bereich kritischer Ströme. Elektro-Apparate Mitt. 10 (1970) 1-4
- D.Amft, G.Drummer: Häufigkeitsmessungen der mittleren Geschwindigkeit eines zwischen Lauelektroden wandernden Plasmabogens. Wiss. Z. Elektrotechn. Leipzig 17 (1971) 243-260
- F.J.Andriessen: The energy balance of a high pressure discharge in a strong axial gas flow. Holecotechniek 4 (1974) 35-51
- K.Auleytner: Wiederverfestigung von Entladungsstrecken im magnetischen Gleichfeld. Elektrie 18 (1964) 77-80
- M.Bartosik, M.Walentynowicz: The influence of arcing time on the recovery strength of low-voltage switches. 2nd Sympos. Switching Arc Phen. (1973) II, 68-74
- H.Brakelmann: Verfahren zur Berechnung von Schaltvorgängen in elektrischen Netzen. ETZ-A 95 (1974) 303-308
- T.E.Browne, Jr., A.P.Strom: A study of conduction phenomena near current zero for a.c. arc adjacent to refractory surfaces. AIEE Trans. 70 (1951) 398-409
- T.E.Browne, Jr.: The electric arc as a circuit element. J.Electrochem. Soc. 102 (1955) 27-37
- G.Burkhard: Ueber den Zusammenhang zwischen Verharrzeit und Wanderung von Schaltlichtbögen und ihrem Kontaktmechanismus. Elektrie 24 (1970) 1-4
- G.Burkhard: Ueber die Lichtbogenwanderung auf Löschblechen mit galvanischen Ueberzügen. Elektrie 28 (1974) 211-213
- A.M.Cassie: Arc rupture and circuit severity: a new theory. CIGRE (1939) Rep. 102
- A.M.Cassie, F.O.Mason: Post-arc conductivity in gas blast circuit breakers. CIGRE (1956) Rep. 103

- A.M.Cassie, W.Rieder: Ancillary data for current zero recording. ETZ-A 85 (1964) 312-316
- J.D.Cobine: Research and development leading to the high-power vacuum interrupter. IEEE Trans. PAS-82 (1963) 201-217
- U.Drücke: Ueber die Lichtbogenbewegung im Magnetfeld von Kontaktanordnungen während des Oeffnungsvorganges. Thesis Techn. Univ. Hannover, 1973
- G.Ecker: Unified analysis of the metal vapour arc. Z.Naturforschg. 28a (1973) 417-428
- G.Ecker: Anode spot instability. IEEE Trans. PS-2 (1974) 130-146
- G.A.Farrall: Vacuum arcs and switching. Proc. IEEE 61 (1973) 1113-36
- G.A.Farrall, M.Owens, F.G.Hudda: A scanning electron microscope study of electron emission and topography of surfaces subjected to arcing at high current in vacuum. IEEE Conference Paper C 75 102-9 (1975)
- G.Frind: Ueber das Abklingen von Lichtbögen. Z. ang. Phys. 12 (1960) 231-237, 515-521
- G.Frind: Time constants of flat arcs cooled by thermal conduction IEEE Trans PAS-84 (1965) 1125-31
- G.Frind, R.Hunziker: A fundamental investigation of the interruption process in air-magnetic circuit breakers. IEEE Trans PAS-90 (1971) 360-368
- G.Frind, J.A.Rich: Recovery speed of axial flow gas blast interrupter. IEEE Trans. PAS-93 (1974) 1675-84
- L.S.Frost, R.W.Liebermann: Composition and transport properties of SF_6 and their use in a simplified enthalpy flow arc model. Proc. IEEE 59 (1971) 474-485
- R.D.Garzon: Rate of change of voltage and current as functions of pressure and nozzle area in breakers using SF_6 in the gas and liquid phase. IEEE Paper F 76 168-7 (1976)
- E.Gassmann: Ueber die Bildung von Lichtbogenfusspunkten bei der Berührung leitender Teile mit dem Bogenplasma. 13. Int. Wiss. Koll. Ilmenau (1968)
- A.Grütz, A.Hochrainer: Rechnerische Untersuchung von Leistungsschaltern mit Hilfe einer verallgemeinerten Lichtbogentheorie. ETZ-A 92 (1971) 185-191

- A.Guile et al.: High-current arcs in transverse magnetic fields in air at atmospheric pressure. Proc. IEE (1969) 645-652
- A.Guile, J.G.J.Sloot: Magnetically driven arcs with combined column and electrode interactions. Proc. IEE 122 (1975) 669-671
- J.E.Harry, A.E.Guile: Constricted or diffuse arcs rotating in high magnetic fields in air at atmospheric pressure. Proc. IEEE 115 (1968) 1019-23
- Ch.Heinrich: Die Neuzündung des Niederspannungs-Schaltlichtbogens als Folge verminderter Spannungsfestigkeit. Thesis Techn. Univ. Karlsruhe (1970)
- W.Hermann et al.: Investigation of a cylindrical, axially blown, high-pressure arc. J.Phys. D 7 (1974) 607-619 (a)
- W.Hermann et al.: Experimental and theoretical study of a stationary high-current arc in supersonic nozzle flow. J.Phys. D 7 (1974) 1703-22 (b)
- W.Hertz, H.Motschmann, H.Wittel: Investigations of the properties of SF₆ as an arc quenching medium. Proc. IEEE 59 (1971) 458-492
- A.Hochrainer: Einige Bemerkungen zum Stromnulldurchgang in Wechselstromschaltern. E und M 87 (1970) 15-19
- A.Hochrainer: Eine regelungstechnische Betrachtung des elektrischen Lichtbogens. ETZ-A 92 (1971) 367-371
- A.Hochrainer et al.: Study of arcs in breakers with the help of a cybernetic model under the influence of turbulence. CIGRE (1972) Rep. 13-10
- J.Keitel: Theoretische Betrachtungen zur Löschung u. Wiederezündung des Lichtbogens im Isolierstoffspalt. Wiss. Z. Elektrotechnik 14 (1969) 93-117
- C.W.Kimblin: Anode voltage drop and anode spot formation in d.c.vacuum arcs. J.Appl.Phys. 40 (1969) 1744-52
- C.W.Kimblin: Vacuum arc ion currents and electrode phenomena. Proc. IEEE 59 (1971) 546-555
- C.W.Kimblin: Anode phenomena in vacuum and atmospheric pressure arcs IEEE Trans PS-2 (1974) 310-319
- Z.Kolacinski: Thermal reignition of quasistationary short arc. 2nd Sympos. Switching Arc Phen. (1973) II 39-47
- H.Kopplin, K.P.Rolff, K.Zückler: Study of the effects of gas flow on the performance of gas-blast circuit breakers. Proc. IEEE 59 (1971) 518-524

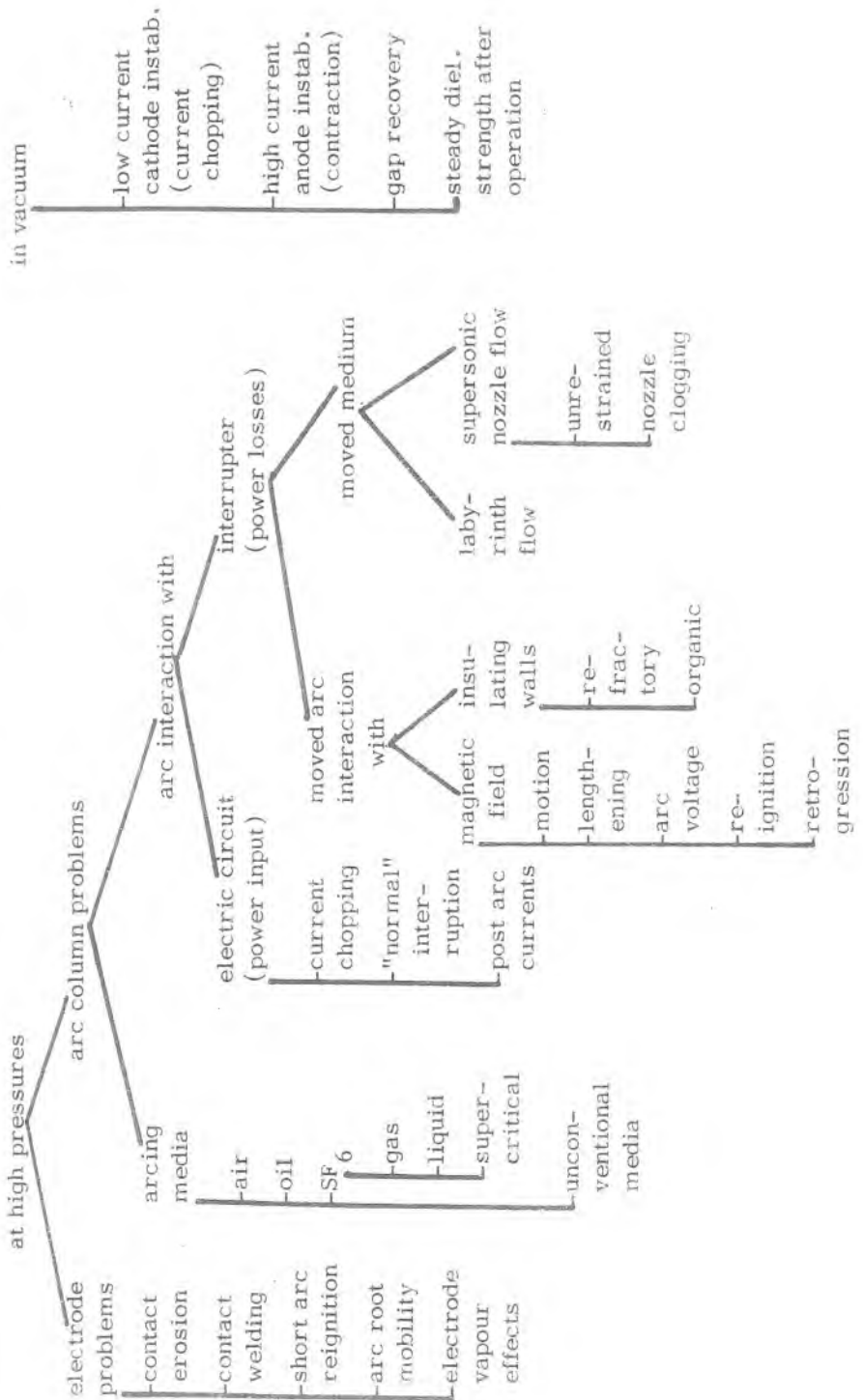
- S.Krajinić, N.Idrizbegović: Einfluss des Löschblechwerkstoffes auf die Niederspannungs-Lichtbogenlöschung. ETZ-A 92 (1971) 81-86
- A.D.Lebedew et al.: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und turbulentem Gasstrom. Elektrie 25 (1971) 362-363
- M.Lindmayer: Ueber den Einfluss des Kammerwandmaterials auf die Lichtbogenlöschung in Löschblechkammern. 1st Sympos. Switching Arc Phen. (1970) 82-87
- M.Lindmayer: The influence of contact materials and chamber wall materials on the migration and the splitting of the arc in extinction chambers. IEEE Trans PHP-9 (1973) 45-49 (a)
- M.Lindmayer: Ueber die Wiederverfestigung von Lichtbogenstrecken in Löschkammern mit Eisenblechen. Bull SEV 64 (1973) 631-638 (b)
- M.Lindmayer: Modell zur Nachbildung der Vorgänge im Stromnullbereich bei Schalten mit Löschblechkammern. Archiv Elektrotechn. 55 (1973) 291-298 (c)
- O.Loh, W.Lange: Zur Lichtbogenbeeinflussung durch Funkenkammermaterialien. Bull. SEV 62 (1971) 400-404
- J.J.Lowke, R.W.Liebermann: Predicted arc properties in sulfur hexafluoride. J.Appl.Phys. 42 (1971) 3532-39
- H.H.Maecker: Principles of arc motion and displacement. Proc. IEEE 59 (1971) 439-449
- O.Mayr: Beiträge zur Theorie des stabilen und des dynamischen Lichtbogens. Archiv Elektrotechn. 37 (1943) 588-608
- G.R.Mitchell: High current vacuum arcs. Proc. IEE 117 (1970) 2315-32
- G.R.Mitchell, L.P.Harris: The structure of vacuum arcs and the influence on the design of vacuum interrupters. IEEE Conf. Paper C 75 067-4 (1975)
- L.Niemeyer, K.Ragaller: Development of turbulence by the interaction of gas flow with plasma. Z.Naturforschg. 28a (1973) 1281-89
- P.Parvenow: Ueber die Spannungsverfestigung von Schaltstrecken mit erhitzten Kammerwänden. Elektro-APP.Mitt. 6(1966) 18-23
- J.F.Perkins, L.S.Frost: Enthalpy-flow limitation of gas-blasted SF₆ arcs. Proc. IEE 118 (1971) 948-954

- J.F.Perkins, L.S.Frost: Current interruption properties of gasblasted air and SF₆ arcs. IEEE Conf. Paper c 72 530-4 (1972)
- J.F.Perkins, L.S.Frost: Effect of nozzle parameters on SF₆ arc interruption. IEEE Trans. PAS-92 (1973) 961-970
- J.F.Perkins: Dielectric recovery and interruption variability of air arcs at atmospheric pressure. IEEE Trans PAS-93 (1974) 281-288 (a)
- J.F.Perkins, L.S.Frost: Time variation of nozzle-clogging in SF₆-blasted arcs near current zero. IEE Conf.Publ. 118 (1974) 498-501 (b)
- J.Pratl: The current limit of gas-flow circuit-breakers using the nozzle as an arc electrode. IEE Conf.Publ. 70 (1970) 365-369
- K.Ragaller, W.R.Schneider, W.Hermann: A special transformation of the differential equations describing blown arcs. J.Appl.Math.Phys. 22 (1971) 920-931
- M.P.Reece: The vacuum switch. Proc. IEE 110 (1963) 793-811
- W.Rieder, J.Passaquin: On the decrease of the current to zero and the residual current in circuit-breakers. CIGRE (1960) Rep. 105
- W.Rieder, J.Urbaneck: New aspects of current-zero research on circuit-breaker reignition. CIGRE (1966) Rep. 107
- W.Rieder: Schwefelhexafluorid als Schaltmedium. E und M 87 (1970) 31-36
- H.Rijanto: Experimentelle Bestimmung der Parameter der verallgemeinerten Lichtbogengleichung zur Berechnung von Schaltvorgängen. ETZ-A 95 (1974) 221-223
- M.Schmelzle: Rechnerische Abschätzung des Einflusses verschiedener Kenngrößen des Kontaktwerkstoffes auf die Löscheigenschaften kurzer Schaltlichtbögen. 5th Int. Conf. on El. Contact Phen. (1970) 94-97
- J.Schwarz: Dynamisches Verhalten eines gasbeblasenen, turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens. ETZ-A 92 (1971) 389-391
- J.Schwarz: Berechnung von Schaltvorgängen mit einer zweifach modifizierten Mayr-Gleichung. ETZ-A 93 (1972) 386-389
- A.Selzer: Vacuum interruption. Proc. IEEE 59 (1971) 233-253
- D.C.Strachan: A study of the radiative energy losses from an arc in jet flow. J.Phys D 8 (1975) 703-713

- G.Studtmann: Ueber die Wiederverfestigung der Lichtbogenstrecken von
Steuerschaltern mit Einfach- und Doppelunterbrechung. El. Ausrüstung
10 (1969) No.5
- H.W.Sudhölter: Die Lichtbogenwanderung zwischen sich erweiternden Elektro-
den bei grossen Strömen. ETZ-A 95 (1974) 116-118
- H.W.Sudhölter: Lichtbogenwanderung bei einer Erweiterungsstelle der Elektro-
den für Ströme bis 90 kA. ETZ-B 27 (1975) H.9
- B.W.Swanson, R.M.Roidt: Some numerical solutions of the boundary layer
equations for an SF_6 arc. Proc. IEEE 59 (1971) 493-501 (a)
- B.W.Swanson, R.M.Roidt, T.E.Browne, Jr.: Arc cooling and short line fault
interruption. IEEE Trans. PAS-90 (1971) 1094-1102 (b)
- B.W.Swanson, R.M.Roidt: Thermal analysis of SF_6 circuit breaker arc. IEEE
Trans. PAS-91 (1972) 381-389
- H.G.Thiel: Turbulence controlled high-power arcs with different electron and
gas temperatures. Proc. IEEE 59 (1971) 508-517
- J.Urbanek: Zur Berechnung des Schaltverhaltens von Leistungsschaltern;
eine erweiterte Mayr-Gleichung. ETZ-A 93 (1972) 381-386
- J.Urbanek: Stresses in high-voltage circuit-breakers when interrupting cur-
rent. Brown Boveri Rev. 61 (1974) 124-129
- A.Walter: Zusammenhang zwischen Induktion und Spannungsanstieg bei der
Lichtbogenwanderung auf V-förmigen Elektroden. ETZ-A 88 (1967) 1-7

T a b l e I

Circuit-Breaker Arc Research



VII. Poglavlje

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

Alfred Ašner
CERN
1211 Genève 23

PRIJENOS ELEKTRIČKE ENERGIJE POMOĆU SUPRAVODLJIVIH KABELA

U referatu se najprije definira mjesto supravodljivih kabela u budućem razvoju energetike. Nakon kratkog pregleda klasičnih i kriogenskih kabela i njihovih graničnih mogućnosti, referat daje osnove mekih i tvrdih supravodiča i analizira njihove gubitke uslijed magnetske histereze.

Prelazeći na praktičnu realizaciju supravodljivih kabela, referat analizira dielektrička svojstva prikladnih izolatora kod niskih temperatura i pokazuje, da je vrpca od Nb₃-Sn-a vrlo prikladan supravodič za izradu kabela. Opisuje se razvoj koji je doveo do laboratorijskog modela kabela za 380 kV i snagu od 8000 MVA.

U slijedećem poglavlju se izvode električki parametri prijenosnih sistema supravodljivim kabelima i pokazuje, da se mogu projektirati sa karakterističnom impedancijom jednakom valnoj. Referat se, zatim, osvrće na principe projektiranja rashladnih sustava za supravodljive kabele duže od 100 km i pokazuje, da se primjenom nadkritičnog helija od 5... 15 at i 6... 10 K mogu dobiti prikladni sistemi koji potpuno zadovoljavaju, ne samo kod stacionarnih, već i kod prijelaznih pojava struja kratkog spoja te trajnih preopterećenja supravodljivog kabela.

SUPERCONDUCTING CABLES FOR POWER TRANSMISSION

The paper first tries to define the place of superconducting cables in future energy research. After a brief review of the state of the art of conventional and cryogenic cables, the basic principles of soft and hard superconductors are explained, notably their hysteresis losses.

As to the practical design of superconducting a.c. cables, the paper discusses the dielectric properties of possible insulating materials at low temperature. It is then shown that Nb₃-Sn ribbon is a very suitable material for superconducting cables, as successfully demonstrated by the recently developed model of a 380 kV, 8000 MVA cable.

The electrical parameters of superconducting cable lines have been analyzed and it has been found, that such systems may be built with a characteristic impedance equal to the surge impedance.

The paper concludes with the principles of refrigeration systems for such cables several hundreds of km long and shows, that cooling with supercritical He under 5... 15 at and 6... 10 K is advantageous, since such a system will perform satisfactorily under steady state, transient and overload conditions.

1. Uvodna opaska

Na početku ovog referata htio bih naglasiti, da nisam specijalista na području prijenosa električne energije pomoću supravodljivih kabela. Kad se, međutim, postavilo pitanje održavanja gornjeg referata, mogao sam se odazvati pozivu da isti održim, zahvaljujući prvenstveno Dr Ericu Forsyth-u, šefu razvojnog projekta supravodljivih kabela u američkom nacionalnom laboratoriju u Brookhavenu kraj New Yorka.

Dr Forsyth i ja smo niz godina radili na sličnim problemima ekstrakcije snopa iz sinhrotrona. Preuzevši nakon toga razvojni projekt supravodljivih kabela, on me je redovno obavještavao o svom radu i spremno mi poslao sav traženi materijal za ovaj referat, na čemu mu i ovom prilikom srdačno zahvaljujem.

Zbog toga je razumljivo da će se gornji referat pretežno, iako ne isključivo, bazirati na radovima Brookhavenske grupe, što nikako ne znači da ga treba preferirati u odnosu na slične, paralelne radove u Zapadnoj Evropi, Japanu, SSSR-u pa i u samim USA.

2. Mjesto supravodljivih kabela u budućem razvoju energetike

Teoretska i eksperimentalna istraživanja na području prijenosa električne energije pomoću supravodljivih kabela određeni su i sastavni dio šireg razvojnog programa s ciljem, da se našoj planeti i u budućnosti osigura potrebna energija. U najsažetijem obliku ta aktivnost obuhvaća plansko i racionalno korištenje postojećih klasičnih izvora energije (hidrauličke, nafte, zemnog plina, ugljena, nuklearne), zatim prelaznu fazu klasičnih i novih

oblika energije te daljnju budućnost, u kojoj će se sva energija dobivati fuzijom vodika, kojim obiluje atmosfera kao i mora u gotovo neograničenim količinama.

Na području sekundarne energije, koja će i u budućnosti biti pretežno električka, razvojna će se aktivnost koncentrirati na probleme praktične realizacije generatora sve većih jediničnih snaga, tj. generatora sa supravodljivim uzbuđnim namotom rotora i adekvatno hlađenim statorom, o kojim će referirati dr Bratoljić.

Na području prijednosa električke energije trebat će razviti 750 kV-ne i 1000 kV-ne dalekovode za prijenos ogromnih snaga izmjeničnim ili istosmjernim naponom te podzemne kabele klasičnog, kriootpornog i supravodljivog tipa.

3. Kratak pregled klasičnih i kriootpornih kabela

Klasični podzemni kabele se mogu podijeliti u dvije grupe s dielektrikom od papira, natopljenog uljem ili od elektronegativnog plina, pretežno SF_6 .

Oba su kabela u koncepciji i izvedbi jednostavni i ekonomični. Fazni vodiči kabela prve grupe smješteni su u zajedničku čeličnu cijev, u kojoj cirkulira ulje pod pritiskom od cca 15 at. Dielektrik, papir natopljen uljem, namotan je oko vodiča. Toplinu, uslijed omskih gubitaka, dielektričkih gubitaka te vrtložnih struja u oklopu, odvodi ulje na vanjski oklop, odnosno na okolno tlo. Toplinski kapacitet ograničuje snagu tih kabela na 900 MVA kod 380 kV. Prisilnom cirkulacijom ulja te individualnim magnetskim oklapanjem svake faze može se granica povisiti na 1200 MVA, pa čak i na 2500 MVA.

Kabele, punjeni sa SF_6 , građeni su u obliku krutih koncentričnih cijevi s distantnim izolacionim prstenima. SF_6 je pod pritiskom od 2 at; tipične snage takvih kabela iznose 2000 MVA kod 380 kV, a postoje projekti i za bitno veće snage.

Nedostatak tih kabela je njihova krutost te potreba da se brižno odstrani sva vlaga, kako ne bi došlo do stvaranja korozivnih kiselina.

Poznato je, da se omski otpor određenih metala poput Al i Be naglo smanjuje snižavanjem temperature, osobito ako se radi o

vrlo čistim metalima bez primjesa. Na omski otpor utječe i magnetsko polje (efekt ma netorezistivnosti) te ukrućivanje strukture uslijed formiranja vodiča.

Studije i radovi na modelima takvih kriokabela s pretežno aluminijskim vodičima su pokazali, da se kriokabeli ne mogu smatrati tehničkim ni ekonomičnim rješenjem.

Pritom treba naglasiti, da zbog koeficijenta praktične realizacije Carnot-ovog ciklusa postoji slijedeća relacija između "toplih" i "hladnih" vata W_t i W_R , odnosno između energije koju treba privesti rashladnom stroju pri temperaturi okoline T_t da se uzmgnu absorbirati "hladni" vati kod temperature T_R :

$$\frac{W_t}{W_R} = \frac{1}{\eta_c} \frac{T_t - T_R}{T_R} \dots\dots\dots (1)$$

Za temperaturu tekućeg dušika (N_2) od 70 K $\eta_c = 0.3$, a za temperaturu tekućeg vodika (H_2) od 20 K $\eta_c = 0.2$, tako da je konačna "topla" energetska bilansa ista kao za klasičan kabel, ako se npr. uzme u obzir, da je otpor čistog Al kod 70 K 10 puta manji nego kod 300 K.

Prema tome, primjenom kriokabela ne postiže se, kako se to često krivo misli, smanjenje omskih gubitaka, već jedino njihova koncentracija, prebacivanje u točku u kojoj se nalazi rashladni stroj. Tehnički i ekonomski proračuni i eksperimenti ustanova poput General Electric Co. u USA te Compagnie Générale de l'Électricité i Air Liquide-a u Francuskoj su pokazali, da bi se upotrebom kriokabela prenosna snaga mogla povećati 2 puta u odnosu na klasične kabele, da problem dielektrika s adekvatnom probojnom čvrstoćom još nije riješen, kao ni problem ekonomične proizvodnje vrlo čistog Al s definiranim specifičnim otporom kod niskih temperatura.

4. O osnovnim postulatima supravodljivosti i mogućnostima primjene na supravodljive kabele

Supravodljivost je 1911. godine otkrio nizozemski fizičar Heike Kamerlingh Onnes, provjeravajući svoju teoriju, prema kojoj su metali trebali izgubiti omski otpor nešto iznad 0 K. K. Onnes je otkrio nagli prijelaz u supravodljivo stanje izvjesnih metala kao žive kod 4.2 K (temperature tekućeg He kod 1 at) te ovisnost

supravodljivog stanja o vanjskom magnetskom polju H_v .

1961.godine su Kunzler i njegova grupa u laboratoriju američke firme Bell Telephone Company otkrili i razvili tvrde supravodiče na bazi slitina Nb-a, oslanjajući se pritom na fundamentalne radove Cooper-a, Bardeen-a i Schrieffer-a iz 1957.godine. U najsažetijem obliku osnovni su postulati supravodljivosti slijedeći:

Supravodljiva svojstva se susreću u mnogim metalima te u slitinama, dobivenim fizikalnim i kemijskim procesima, pri čemu je fenomen ograničen kritičnom temperaturom T_k , kritičnom gustoćom struje J_k te kritičnim magnetskim poljem H_k . (v.sl.1)^x

Praktičnu važnost ima, međutim, samo ograničen broj supravodiča prema sl.2, tako da je velika većina supravodiča danas tehnički neinteresantna, bilo zbog niskih T_k , J_k i H_k bilo zbog nestabilne strukture.

Supravodiči se dijele na mekane i tvrde; mekani su svi metalni prema sl.2, a tvrdi slitine. Mekani supravodiči imaju bitno manju faznu plohu i potpuno su diamagnetični do kritičnog magnetskog polja $H_v = H_k$, što znači, da kritične gustoće struje J_k , koje teku u vrlo tankom površinskom sloju, potpuno oklapaju supravodič i istiskuju vanjsko polje H_v . To je tzv. Meissner-ov efekt, koji kaže da je unutar supravodiča

$$\mu \cdot H_n = \mu H_v + M = 0; \quad M = -\mu H_v \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fizikalna slika zbivanja u tvrdim supravodičima ili II tipa su kompleksnija. Jasno i fenomenološki točno tumačenje zahvaljujemo Bean-u (1). Njegov model supravodiča II tipa prikazan je na sl.3 u obliku mreže, tkiva od supravodiča I tipa s kritičnim poljem H_k , koje veže niz jezgara tvrdog supravodiča.

Dok je vanjsko polje $H_v \leq H_{k1}$, (značenje indeksa "1" vidjet će se kasnije) model se ponaša kao supravodič I tipa. Postepenim povećanjem H_v , tako da je $H_v \geq H_{k1}$, teći će u vanjskom sloju debljine struje kritične gustoće J_k , tako da će magnetizacija tih struja održati ravnotežu sa $H_v - H_{k1}$. Polje H_v kod kojeg je struja kritične gustoće J_k zauzela cijeli presjek vodiča, i koje je prema tome potpuno prodrlo u unutrašnjost vodiča, označit ćemo s H_{k1} . Daljnjim povišenjem H_v smanjit će se J_k prema sl.1, dok kod gornjeg

^x Slike su date na kraju teksta.

kritičnog polja H_{k_2} supravodič ne postane normalan.

Budući da nas zanima primjena supravodiča I i II tipa za kabele izmjeničnog napona, trebat će poznavati gubitke po ciklusu. U idealnom Meissnerovom području za $H_v \ll H_{k_1}$ ti su gubici jednaki nuli, a u području $H_{k_1} < H < H_{k_1}^*$ vrijedi relacija:

$$w = w_0 \left(\frac{H}{H_{k_1}} \right)^3 \dots\dots\dots (3)$$

Kod punog prodiranja $H_{k_1}^* < H < H_{k_2}^*$ se lako pokazuje, da gubici u supravodiču iznose - vidi sl.4 i 5 -

$$w = J_k \cdot \delta_v \cdot \frac{d}{4} \cdot v [w_1] \dots\dots\dots (4)$$

Fizikalnu teoriju supravodljivosti zahvaljujemo trojki Cooper-Bardeen-Schrieffer, braći London te Guinzburgu i Landau-u.

Prvi su pokazali, da u supravodičima postoje parovi elektrona suprotnog impulsa i spina, tzv. Cooperovi parovi. Vezna energija tih elektrona je tolika da gubici, uslijed sudara s ionima u metalu, ne utječu na tu vezu.

Guinzburgu i Landau-u treba zahvaliti za jedinstvenu teoriju, koja obuhvaća supravodiče I i II tipa. Prema toj teoriji postoje u svakom supravodiču normalni i Cooperovi elektroni. Kod prijelaza u normalno stanje, broj Cooperovih elektrona postaje jednak nuli, a kod temperature od 0 K, svi su elektroni Cooperovi. Uvođenjem rednog parametra G i L definiraju broj supravodljivih elektrona. Supravodiči II tipa su karakterizirani kvadratom rednog parametra, dok konstantan redni parametar daje teoriju supravodiča I tipa, koju su još 1930. godine postavila braća London.

5. Supravodljivi kabeli za prijenos izmjeničnim naponom

i) Svojstva nekih izolacionih materijala kod niskih temperatura

Izbor i svojstva dielektrika, tj. kuta gubitaka $\tan \delta$ te probojne čvrstoće E_p od velike su važnosti za konstrukciju supravodljivih kabela. U prvi čas bi se moglo pomisliti, da takve kabele treba dimenzionirati za visoke struje i niske napone. Tehnička i ekonomska analiza, međutim, pokazuju, da bi se takvi kabeli loše uklapali u prijenosne sustave, da ne udovoljavaju zahtjevima u odnosu na prenapone i struje kratkog spoja te da su neekonomični,

uzme li se u obzir, da je cijena dielektrika daleko niža od cijene supravodiča.

Kriotehnički dielektrici se mogu podijeliti na tekuće, krute lamelirane, koji su "impregnirani" tekućim dielektrikom te na krute izolatore. U prvu grupu treba uvrstiti tekući He, i dobar dio projekata supravodljivih kabela polazi od tog dielektrika. Dielektrički gubici čistog tekućeg He su neznatni; $\text{tg} \delta$ iznosi 10^{-6} kod 50 Hz.

Probojna čvrstoća tekućeg He je, naprotiv, problematična. Mjerni rezultati su oskudni i odnose se na laboratorijske eksperimente s površinama elektroda, koje su do 10^7 puta manje od površina u supravodljivom kabeu. Čistoća rashladnog medija, prisutnost vlakna utječu na E_p u omjeru 1:3.

Tipične mjerene vrijednosti su $140..170 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ kod 1 at te $230 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ kod 6 at pri razmaku elektroda od 0,1 ... 0,7 cm.

Uzme li se u obzir površinski efekt, prema kojem se E_p originala u odnosu na model smanjuje za 10% po faktoru 10 omjera površina, faktor sigurnosti itd., dolazi se do optimističnih, još neprovjerenih vrijednosti od $\approx 50 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

Rezultati mjerenja tekućim He impregniranog poroznog papira još su oskudniji. Čini se, da se probojna čvrstoća povećava za 30%, dok se dielektrički gubici znatno povisuju na $10^{-3} < \text{tg} \delta < 10^{-2}$.

Preostaju kruti dielektrici, od kojih polietilen i polipropilen imaju vrlo interesantna svojstva kod niskih temperatura: kut gubitaka iznosi $1 \dots 2 \cdot 10^{-5}$, a probojna čvrstoća je otprilike 10 puta veća od čvrstoće tekućeg He.

Daljnji naporu su potrebni za razvoj i ispitivanja prikladnih krutih dielektrika i njihovih mehaničkih svojstava poput kontrakcije, krhkosti i sl.

ii) O izboru supravodiča i nekim praktičnim realizacijama kabela

Projektirati, razviti supravodljivi kabel znači primijeniti novu tehnologiju na ustaljen, provjeren i ekonomičan element prijenosa električne energije, kako je to danas često slučaj i na drugim područjima elektrotehnike. Uspjeh takvog projekta ovisit će o harmonizaciji, optimalnoj primjeni nove tehnologije i re-

zultata, iskustava "starog", ustaljenog elementa.

Čini se, da se razvojna grupa u Brookhaven-u povelala za tim principom. Modeli njihovih kabela se u velikoj mjeri oslanjaju na provjerene koncepte klasičnih kabela, dok su nužne modifikacije uvjetovane samim supravodičem. Tako je odbačen krut, koaksijalni kabel s tekućim He kao rashladnim medijem i izolatorom kao skupo, mehanički i dielektrički neadekvatno rješenje, pa je predložen kabel koji je, kako će se kasnije pokazati, fleksibilan, s lameliranim krutim dielektrikom te vrlo prikladnim i ekonomičnim supravodičem u obliku trake od Nb₃-Sn-a.

Treba spomenuti da su kabeli, koji će se promatrati, predviđeni za prijenos izmjeničnim naponom. Ti se kabeli mogu primijeniti i za prijenos istosmjernim naponom, pri čemu se prijenosna snaga povećava 2 do 4 puta.

Odluka o izmjeničnom ili istosmjernom naponu ovisit će pretežno o ekonomskim faktorima, a ti uključuju opremu za pretvaranje energije u slučaju istosmjernog napona. Razmatranja vode do kritične duljine kablenskog voda, iznad koje je prijenos istosmjernim naponom ekonomičniji.

Za dimenzioniranje kabela za prijenos izmjeničnim naponom treba najprije odabrati supravodič. U prvi mah se čini, da je najprikladniji supravodič čisti Nb, kako su to predložili i primijenili izvjesni autori [2], polazeći od visokog H_{k1} i povoljnog Meissnerovog područja tog supravodiča (vidi sl.6). Gubici histereze kod 50 Hz iznose $5...6 \frac{\mu W}{cm^2}$ po aktivnoj površini Nb-a.

Uzme li se u obzir, da supravodljivi kabel treba dimenzionirati za maksimalnu struju kratkog spoja $I_E = 10 I_n$, onda se vidi, da kod tih preopterećenja vodič od čistog Nb-a postaje normalan. Niska kritična temperatura Nb-a od svega 9 K je drugi nedostatak tog materijala.

Isto tako treba odbaciti hibridno rješenje kabela s dva paralelna sloja supravodiča ili s kombinacijom Nb-a i kriovodiča, pri čemu bi Nb vodio nazivnu struju I_n , a ne i I_k , jer takva rješenja znatno poskupljuju sam kabel i rashladni sustav.

Sl.7 pokazuje prilike kod vrpce od Nb₃-Sn-a s H_{k1} , H_{k2}^* te relativno ograničenim Meissnerovim područjem. Mjerenja gubitaka histereze u Nb₃-Sn-u u Brookhavenu su pokazala da je taj vodič

najprikladniji za supravodljive kabele. Gubici kod nazivne struje su, doduše, veći, 10 ... 20 $\frac{W}{cm^2}$, no još uvijek prihvatljivi. Bitno je, da je Nb₃-Sn i kod I_k supravodljiv, te da kritična temperatura tog materijala omogućuje izvedbu jednostavnijih i efikasnijih rashladnih sustava. Za proračun i dimenzioniranje supravodiča u kabelu zgodno je uvesti slijedeće relacije:

Označimo li sa λ gubitke uslijed histereze po jedinici površine supravodiča i sa ζ strujni oblog po jedinici oboda vodiča, onda se može uvesti ekvivalentni "naponski gradijent" gubitaka:

$$E_g = \frac{\lambda}{\sigma} ; \frac{2\lambda}{\sigma} \left[\frac{V}{cm} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

(ukoliko vodič ima dvije supravodljive površine).

Ako je efektivna struja kabela I [A], onda su njegovi gubici po jedinici duljine:

$$P = \frac{P}{l} = 2 \frac{\lambda}{\sigma} ; 4 \frac{\lambda}{\sigma} \left[\frac{W}{cm} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

Gubici histereze po jedinici površine supravodiča i po periodu izmjeničnog napona se mogu odrediti iz relacije:

$$\lambda = 2 \cdot 10^{-3} \frac{H_V^3}{J_k} = 0.28 \cdot \frac{\sigma^3}{J_k} \left[\frac{W}{cm^2} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

Uzmemo li, primjera radi, jednofazni kabel za 100 kA s obodnom gustoćom $\sigma = 400 \frac{A}{cm}$ te ukupnim gubicima od 1 $\frac{W}{m}$, onda su dopustivi gubici histereze kod 50 Hz $\lambda = 10 \frac{W}{cm^2}$.

Mjerenja na vrpcama od Nb₃ - Sn-a su pokazala, da se kraj pomnog bifilarnog rasporeda vodiča, tj. uz minimalno magnetsko polje H_V, mogu bez većih problema postići tražene linearne gustoće struje σ i specifični gubici λ , (vidi sl.8 i 9).

Prelazeći na praktičnu izvedbu laboratorijskih modela, Brookhavenska je grupa najprije razvila kabele u obliku bifilarno ili kvadrifilarno namotanih svitaka od Nb₃ - Sn-a s izolacijom od propilena - vidi sl.10 i 11 - . Obje sheme se odnose na jednofazni kabel s povratnim vodičem; za trofazni sustav potrebno je bifilarno namatanje i ispreplitanje triju faza R, S i T.

Parametri takvih kabela za relativno niske napone od 35 kV i 70 kV i za visoke struje do 170 kA, sažeti su u tabeli na sl.12.

Na osnovi mjernih rezultata tih modela te detaljnog proračuna gubitaka i rashladnog sustava, Brookhavenska grupa je razvila fleksibilan kabel za srednje i visoke napone i za prijenos vrlo velikih snaga.

Presjek kroz kabel je prikazan na sl.13. Natkritični He struji u jednom pravcu kroz nutarnju cijev, u kojoj se nalazi potporna čelična spirala. Slijedi nutarnji vodič, koji se sastoji od helikoidalnih potpornih segmenata od 2 mm debelog aluminijskog ili bakra. Na segmentima počiva tanka 0,25 mm folija vrlo čistog aluminijskog, a na njoj traka supravodljivog Nb₃ — Sn-a. Vanjski vodič ima istu strukturu. Dielektrik debljine 0,85 cm namotan je od polipropilenske trake. Za zaštitu od korone i kliznih napona predviđena su dva elektrostatska štita od poluvodiča.

Natkritični He u nutarnjoj cijevi odvodi gubitke uslijed histereze u oba supravodiča, dielektričke gubitke i gubitke uslijed vrtložnih struja u metalnim dijelovima. Pri povratnom strujanju He preuzima gubitke u armaturi, gubitke u potpornoj strukturi između vanjskog oklopa (vakuumskog tanka) i zajedničke cijevi te gubitke koji prelaze na kabel konvekcijom i zračenjem.

Sam kabel je sastavljen od paralelnih elemenata. Parametri pojedinog elementa te cijelog sustava od 15 elemenata za snagu od 3000 MVA dati su na sl.14 i 15.

Najnoviji razvoj takvog kabela može se ovako prikazati: tri fazna kabela za (linijski) napon od 380 kV mogu prenositi snagu od 8000 MVA; kritična snaga iznosi 6400 MVA, a kritična duljina sustava 680 km. Promjer pojedinog elementa iznosi 14 cm, a ukupni promjer aktivnog dijela 50 cm.

iii) Supravodljivi kabel i prenosni sistem

Priključak supravodljivog kabela će se neminovno odraziti na prenosni sistem, jer su električke i termičke karakteristike supravodljivog kabela različite od karakteristika klasičnog kabela. Supravodljivi kabel nema omskih gubitaka; ostali se elek-

trički parametri nadaju iz slijedećih relacija:

$$\tilde{G} = \frac{I}{2\pi r_1} \left[\frac{A}{cm} \right] \dots\dots\dots (8)$$

pri čemu je r_1 polumjer nutarnjeg vodiča koaksijalnog kabla prema sl.13. Maksimalno električko naprezanje iznosi:

$$E_{max} = \frac{\sqrt{2} U_L}{\sqrt{3} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \left[\frac{V}{cm} \right] \dots\dots\dots (9)$$

a karakteristična impedancija

$$Z_f = \frac{U_L}{I \cdot \sqrt{2}} = \frac{E_{max} \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\sqrt{2} \pi \tilde{G}} [ohm] \dots\dots\dots (10)$$

Iz poznatih jednadžbi za induktivne i kapacitivne reaktancije slijedi normirana valna impedancija:

$$\frac{Z_0}{Z_f} = \frac{\sqrt{Z_L \cdot Z_C}}{Z_f} = 0.43 \cdot \frac{\tilde{G} \cdot E_{max}}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (11)$$

Za $Z_0 = Z_f$ supravodljivi kabel će imati karakterističnu impedanciju jednaku valnom otporu. U tom slučaju mora biti ispunjena relacija:

$$\frac{\tilde{G}}{E_{max} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = 1.87 \cdot 10^{-3}$$

Relacija je ispunjena, ako se uvrste slijedeći, za supravodljive kabele ostvarivi parametri: $\epsilon_r = 2$, $E_{max} = 160 \frac{kV}{cm}$, $\tilde{G} = 400 \frac{A}{cm}$. Iz ovog razmatranja proizlazi, da za razliku od klasičnih kabla, supravodljivi kabele imaju vrlo povoljne električke karakteristike i da se može ostvariti kabel sa $Z_f = Z_0$. Supravodljivim kabelema se, prema tome, može prenositi energija na više 100 km, tako da su u tom pogledu ti kabele slični dalekovodima.

iv) Problematika hlađenja supravodljivih kabla u stacionarnom stanju i kod preopterećenja

Dimenzioniranje rashladnog sustava za supravodljivi kabel se svodi na primjenu zakona hidrodinamike i prijelaza topline na rashladni medij, He, koji struji u kabelu. Proračuni se vrše pomoću računskih programa, koji određuju pritisak i protok He, prijelaz topline te promjenu entalpije duž kabla proizvoljne duljine i toplinskog toka.

Sl.16 pokazuje listu parametara kriogenog proračuna za 5 km dug sektor koaksijalnog kabla za prijenos snage od 3000 MVA i to za supravodiče od Nb i Nb₃-Sn-a. Duljina kabla je 5 km, ukupan polazni i povratni put He 10 km, a udaljenost rashladnih centara 10 km.

Iz gornje tabele se vidi da su gubici hlađenja u kabeu s Nb₃ - Sn-a dva puta manji od kabla sa Nb i to zbog niske kritične temperature i neznatnog raspoloživog temperaturnog gradijenta Nb- od AT = 0,5 K. Za hlađenje tog kabla bi, osim toga, trebalo predvidjeti "hladnu" pumpu, a gubitke te pumpe, svedene na temperaturu okoline, trebalo bi pribrojiti ostalim gubicima.

Treba još analizirati, kako će rashladni sustav reagirati na prelazne i trajne struje kratkog spoja, na trajna preopterećenja itd. Sl.17 prikazuje vremenski dijagram struje kratkog spoja I_k , prema kojoj treba dimenzionirati svaki kabl, pa i supravodljivi. Od kabla se također zahtijeva da nakon 4 perioda I_k , prema sl.17, ponovno vodi nazivnu struju I_n i da bez oštećenja vodi kroz 0,5 s struju I_k prema istoj slici.

Kabl treba također zaštititi u slučaju kvara dewara ili cilindra s He, u slučaju električkog proboja te quench-a, tj. prijelaza dijela ili cijelog supravodiča u normalno stanje. U prva dva slučaja trebat će isključiti kabl.

Problem quench-a zaslužuje posebnu pažnju. Supravodič može postati normalan uslijed zagrijavanja zbog povišenih gubitaka histerese u kratkom spoju uslijed neznatnih mehaničkih pomaka supravodiča, koji su identični s promjenom magnetskog toka i induciranjem struja te uslijed promjene temperature rashladnog medija u izvjesnoj točki. Ako pretpostavimo da je supravodljivi oblog kabla dobro učvršćen i rashladni uređaj ispravno dimenzioniran, onda preostaje zagrijavanje uslijed preopterećenja i struje I_k .

Pokušajmo najprije analizirati dvije koncepcije vođenja struje I_k supravodičem od Nb₃ - Sn-a, koji je dimenzioniran za vođenje I_k te sistem paralelnog kriovodiča, koji bi u slučaju preopterećenja te I_k trebao preuzeti vođenje struje. Ta je koncepcija u literaturi poznata pod imenom entalpijske stabilizacije.

Može se pokazati da to rješenje treba odbaciti. Omski gubici ugrijat će kriovodič i povećati pritisak i temperaturu helija.

Takva shema, u stvari, sprečava supravodič da ponovo vodi struju, jer nema razloga da se quench, odnosno preljev struje u kriovodič, svaki puta ne ponovi u istoj točki poluperioda struje I_k .

Preostaje, dakle, princip dimenzioniranja $Nb_3 - Sn$ -a za trajna preopterećenja i I_k .

Ovisnost gubitaka histereze o struji I_k , odnosno o odgovarajućem polju H_{vk} i o temperaturi T , data je relacijom:

$$W = W_0 \left(\frac{H_{vk}}{H_0} \right)^3 \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T_K}}{1 - \frac{T}{T_K}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Slično će porasti i gubici uslijed vrtložnih struja u metalnim dijelovima kabela.

Vremenske konstante prijelaza topline rasporeda supravodič - folija - potporni metalni segment kabela prema sl.13 iznosi svega 10 ... 100 μs , dok je vremenska konstanta miješanja He, koja proizlazi iz jednadžbe (13) Dittus-Boeltera, bitno veća.

$$\tau = 0.1 c_k \cdot \eta^{0.2} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{D} \right)^{0.8} \left[\frac{W}{cm, K} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

U toj je jednadžbi k koeficijent prijelaza topline $c_k \left[\frac{W}{g, K} \right]$ specifična toplota, $\eta \left[\frac{g}{cm} \right]$ viskozitet, $\dot{m} \left[\frac{g}{s} \right]$ protočna masa He te promjer cijevi.

Duljina izmjenjivača topline za

$$\dot{Q} = \dot{m} c_k [T_{k, st} - T_{k, r}] [W] \quad \dots\dots\dots (14)$$

iznosi

$$L = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Lambda} [cm] \quad \dots\dots\dots (15)$$

sa

$$\Lambda = \frac{T_{k, st} - T_{st} (T_k = T_{st})}{\ln \frac{T_{k, st} - T_{st}}{T_k - T_{st}}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

T_{st} je temperatura stijenke.

Vremenska konstanta miješanja iznosi:

$$\tau_{He} = \frac{L}{v} [s] \quad \dots\dots\dots (17)$$

sa v brzinom strujanja He.

Tipične vrijednosti za τ_{He} iznose 10 ... 30 s i prema tome je očito, da masa He ne sudjeluje pri preuzimanju topline kod prelaznih pojava koje traju 0,5 s.

Iz gornjeg proizlazi, da toplinu kod prelaznih pojava poput struje I_k , preuzima tanak površinski sloj He debljine d .

Označimo li sa τ vremensku konstantu prijelaza topline između sloja He debljine d i vodiča, onda je:

$$\tau = \left(\frac{\Delta T}{W} \right)^2 \cdot k \cdot c \quad [s] \quad \dots\dots\dots (18)$$

i

$$\tau = 0.5 \cdot \frac{c d^2}{k} \quad [s] \quad \dots\dots\dots (19)$$

Ako se za kabel prema sl.13 uvrste u gornje jednačbe gubici u Nb_3-Sn -u kod $I_k = 10 I_n$, dozvoljeno povišenje temperature ΔT , izlazi $\tau = 0,135$ za sloj debljine 0.01 cm.

Sličnim razmatranjem se može pokazati, da je toplinski kapacitet sloja He debljine d dovoljan za preuzimanje gubitaka eksponencijalno prigušene struje I_k prema sl.17. Ako sa τ_f označimo vremensku konstantu dekrementa, onda je

$$\frac{I}{I_0} = F \cdot e^{-\frac{t}{\tau_f}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

i postulirajući, da je

$$\tau'_{He} = \frac{1}{2} \tau_f \quad \dots\dots\dots (21)$$

izlazi

$$F = \sqrt{\frac{\Delta T}{W_0} \sqrt{\frac{6 k c}{\tau_f}}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

Za kabel prema sl.13 izlazi $F=9,5$, što zadovoljava.

Porast temperature i pritiska u He, nakon vođenja struje I_k te nakon završenog miješanja He, mogu se odrediti iz jednačbe povećanja entalpije po jedinici volumena:

$$\Delta h = 4 \frac{D_1^2}{D_u^2} \cdot \int_0^\infty W(t) dt = \frac{4 D_1^2 W_0 F^2 \tau}{8 D_u^2} \left[\frac{W_0}{cm^3} \right] \quad \dots\dots\dots (23)$$

sa D_1 [cm] promjerom nutarnjeg vodiča kabla te D_u [cm] promjerom nutarnjeg rashladnog kanala. Za kabel prema sl.13 se dobivaju vrijednosti od 0.15 K i 0.18 at, koje se bez daljnjeg mogu podnijeti.

Zaključujući ovo poglavlje, osvrnut ćemo se načas na rashladne sustave za supravodljive kabele. Spomenimo da je osnovne principe i cikluse rashladnih strojeva opisao poznati stručnjak na tom području prof.dr Trepp [3].

Rashladni sistemi za hlađenje supravodljivih kabela od više 10 km ili čak 100 km razlikovat će se od sistema za hlađenje individualnih potrošača poput magneta, generatora, koji pretežno baziraju na principu kupelji.

Kod tog rasporeda dolazi do isparavanja He uslijed gubitaka u supravodiču, strukturi i sl. Entalpija plinovitog He se može iskoristiti za hlađenje strujnih dovoda, kontrolnih kabela te termičkog štita na temperaturi od 20 .. 80 K.

Sl.18 pokazuje dijagram temperature i entropije za He. Crtkano područje je netom spomenuta dvofazna zona helija. Za hlađenje supravodiča od Nb₃-Sn-a najprikladnije je područje (3) ili granično područje (3) - (1). U tim područjima nema dvofaznog He, prijelaz iz tekućeg u plinovito stanje je trenutani i totalan.

Iz sl.18 proizlaze prednosti Nb₃-Sn-a: Visoka T_k tog materijala omogućuje hlađenje natkritičnim He pod pritiskom od 4 ... 15 at u temperaturnom području od 5 ... 9 K te odabiranje najpovoljnije radne točke na liniji maksimalne entalpije.

Radno područje za supravodič od čistog Nb-a se nalazi izvan linije maksimalne entalpije. S obzirom na nizak pritisak potrebno je predvidjeti specijalnu "hladnu" pumpu za cirkulaciju helija.

6. Zaključak

Iz izložene problematike i laboratorijskog razvoja supravodljivih kabela za prijenos električke energije izmjeničnim i istosmjernim naponom, proizlaze slijedeći zaključci:

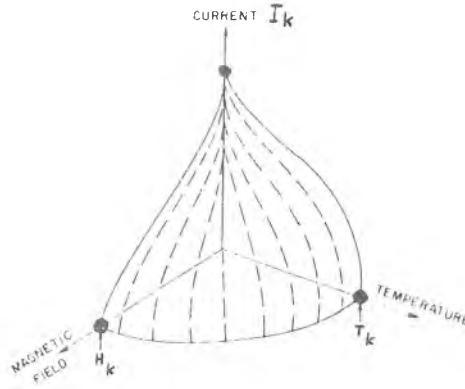
supravodljivi kabele će omogućiti prijenos vrlo velikih snaga od 2 ... 10 GVA po fazi, prvenstveno u industrijske i stambene centre. Od ispravno dimenzioniranih supravodljivih kabela mogu se očekivati slijedeće prednosti:

- i) kritične duljine sustava od više 100 km
- ii) sustave s karakterističnom impedancijom jednakom valnoj

- iii) vođenje struja kratkog spoja bez isklapanja te ponovno vođenje nazivne struje
- iv) mogućnost trajnog cikličkog preopterećenja kroz više sati.

POPIS LITERATURE

1. C.P. Bean Magnetization of Hard Superconductors;
Physical Review Letters, Vol.8, No 6,
March 1962.
2. Rogers, E.C. i dr. A superconducting Link for Laboratory
Tests on Conductors for Superconducting
Cables;
Low Temperatures and Electric Power, str.
127-133, Pergamon Press, New York 1970
3. Trepp, C. Problems of large-scale Refrigeration;
idem, str. 31...41.
4. Forsyth, E.C. Underground Power Transmission by Super-
conducting Cable.
Brookhaven National Laboratory Report
50325, mart 1972.
5. Forsyth, E.C. i dr. Long Distance Bulk Power Transmission
Using Helium-cooled Cables
Brookhaven National Laboratory Report
20250, 1975.



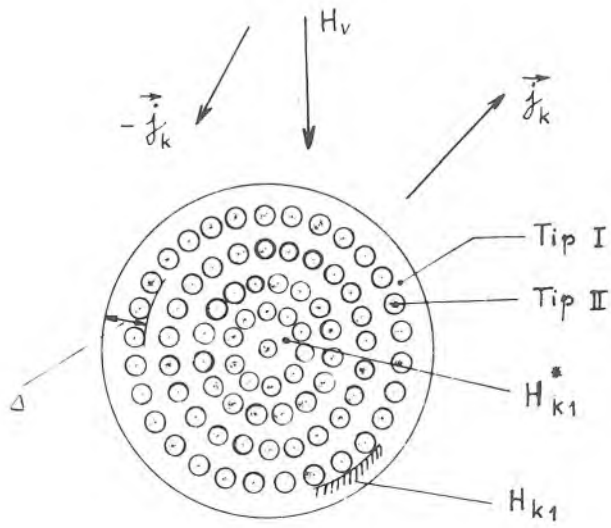
Sl. 1

Properties of Selected Superconductors

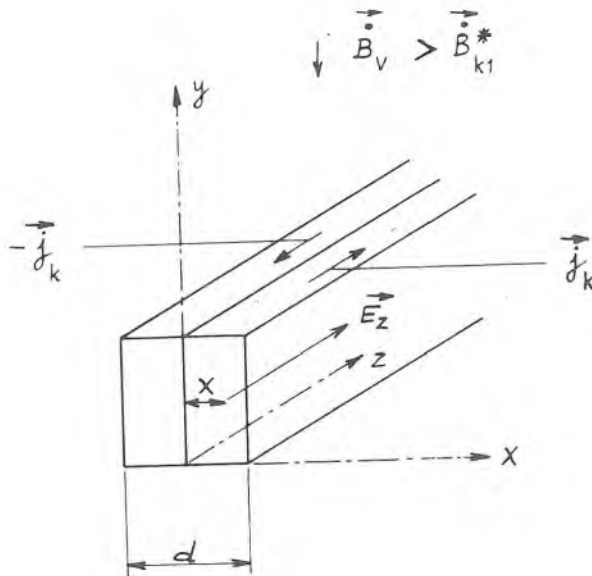
Material	T_k (K)	B_k (T)	Critical current density, j_k at 5 T (A/cm ²)
Elements			
Pb	7.2	0.8	0
Nb	9.3	2 to 20*	10^6
V	5.3	1	
Alloys			
NbTi	10.0	120	10^6
NbZr	10.8	90	10^6
Compounds			
Nb ₃ Sn	18.3	230	10^7
V ₃ Ca	15 to 16	220	10^7
Nb ₃ Al	19.3	360	
V ₃ Si	17.2		
Nb ₃ Al ₂ Ge _y	20.7	410 (at 4.2 K)	

*Depends on degree of cold-working.

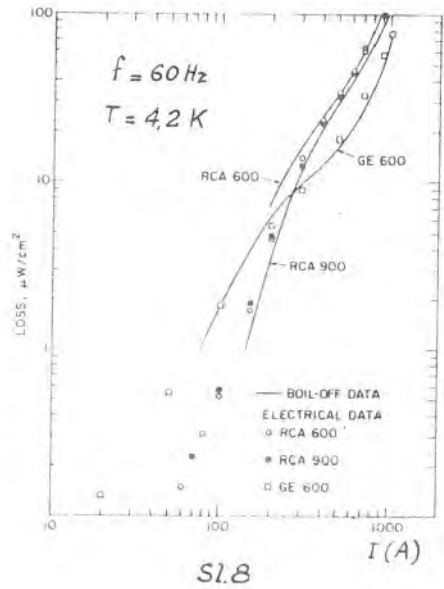
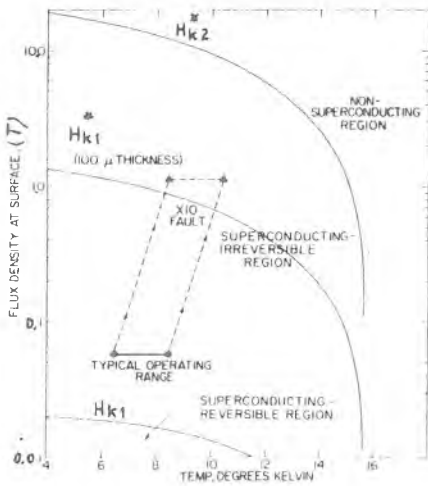
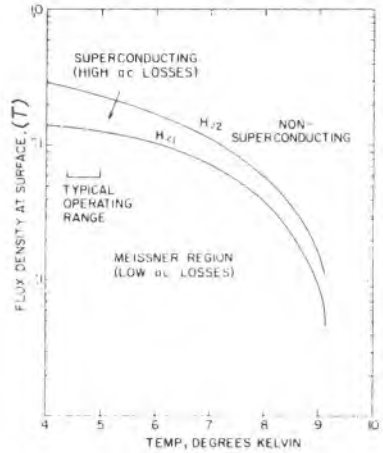
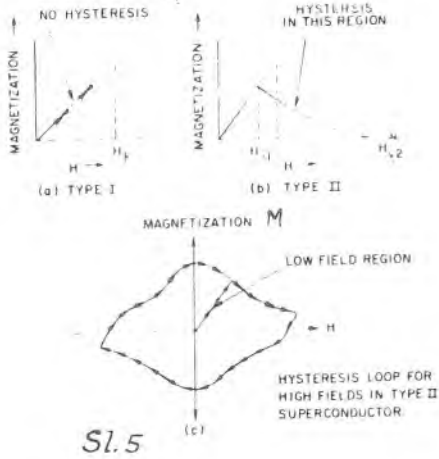
Sl. 2

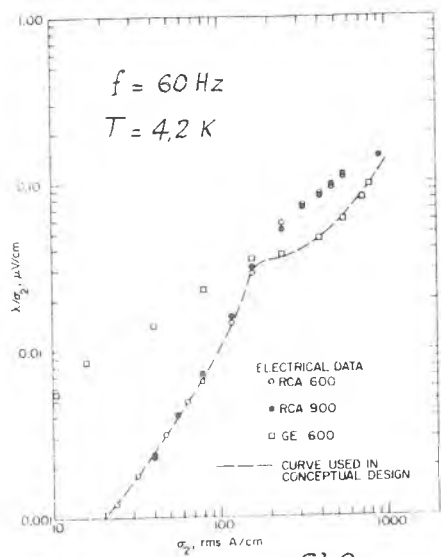


Sl. 3

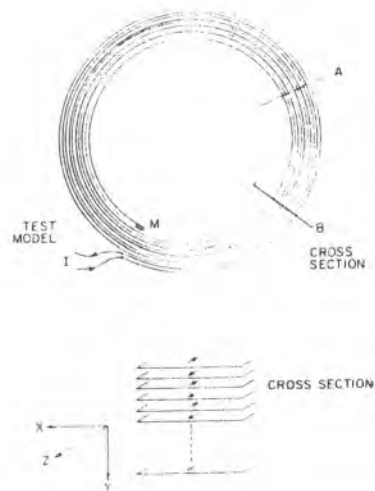


Sl. 4





Sl. 9



Sl. 10

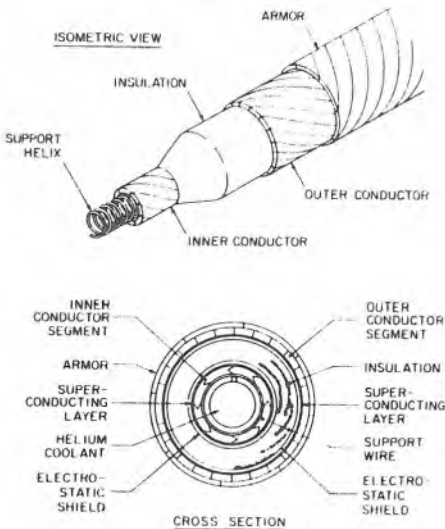


Sl. 11

	34-kV Model	69-kV Model
Kated voltage, line-to-line (U_L), kV	34.5	69
Rated power (P_r), MVA	3000	3000
Critical length (L_c) for $\epsilon_r = 3.0$, miles	275	245
Number of ribbons (N)	21	12
Ribbon separation (b), cm	0.72	1.44
Ribbon width (w), in square array, cm	20	20
Linear current density (σ_L),* A/cm (rms)	369	330
Average stress in dielectric ($\bar{\epsilon}$),* kV/cm	48	48
Peak stress in dielectric ($\bar{\epsilon}_m$),* kV/cm	160	160
Specific magnetic loss (λ) at 4.2 K, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	16	14

	T , K		
Line magnetic loss at various temperatures, W/m	4.2	1.31	0.64
	5.2	1.43	0.70
	6.2	1.57	0.77
	7.2	1.74	0.85
	8.2	1.96	0.96
	9.2	2.24	1.09
	10.2	2.61	1.28
	11.2	3.14	1.54

Sl. 12



Sl. 13

Tentative Characteristics of Flexible Superconducting Coaxial Cable

Rated voltage, line-to-neutral (U_l), kV	76.2
Rated current (I), A	2765
Rated power (P_r), MVA	210
Overall diameter, cm	5.1
Bending radius, cm	100
Weight, lb./mile	12,000
Linear current density (σ), * A/cm (rms)	320
Insulation thickness, cm	0.85
Dielectric constant (ϵ_r or SIC)	2.2
Loss factor	2×10^{-5}
Peak stress in dielectric ($\bar{\epsilon}$), kV/cm	160
Average stress in dielectric ($\bar{\epsilon}_{av}$), kV/cm	90
Inner conductor o.d., cm	2.75
Outer conductor i.d., cm	4.5
No. of segments (inner conductor)	6
No. of segments (outer conductor)	18
Segment thickness (both), mm	2
Conductor base metal	Aluminum
Armor thickness, mm	1
Armor metal	Aluminum

Sl. 14

Tentative Characteristics of a 3000-MVA Line Using Parallel Coaxial Cables

No. of cables per phase	5
Total No. of cables	15
Rated voltage, line-to-line (U_l), kV	132
Rated line current (I), kA	13.8
Rated power (P_r), MVA	3161
Critical length (l_c), miles	≈ 240
Per unit series inductive impedance per mile	2.16×10^{-3}
Per unit shunt capacitive impedance per mile	240
Per unit surge impedance	0.72
Charging power, MVAR/mile	13.2
Dewar i.d., cm	30
Overall pipe diameter, cm	42
Dewar heat influx (with LN_2 shield), W/mile	150
Refrigerator station spacing, * km	10
miles	6.2

Superconducting material	Nb	Nb ₃ Sn
Temp. range, inlet to outlet, K	4.4 to 5.0	6.2 to 8.2
Magnetic losses, W/mile	217	1638
Dielectric losses, W/mile	267	267
Other losses, ** W/mile	50	50
Total refrigerator line load	684	2105
Power input to refrigerator, * kW	3981	2108
Duration of 1.5 times rated current, † hr	5	12

Sl. 15

Parameters for 3000-MVA Ribbon Line Used in Cryogenic Study*

Temperature range, K	Dielectric losses, W/m	Magnetic losses, W/m	Heat leak, W/m	Total losses, W/m	Total line cold loss, W	Hot work at 25% Carnot, kW
4.2- 6.2	0.053	0.70	0.167	0.920	4600	1043
6.2- 8.2	0.053	0.85	0.167	1.070	5350	870
8.2-10.2	0.053	1.09	0.167	1.310	6550	828
10.2-12.2	0.053	1.54	0.167	1.760	8800	907

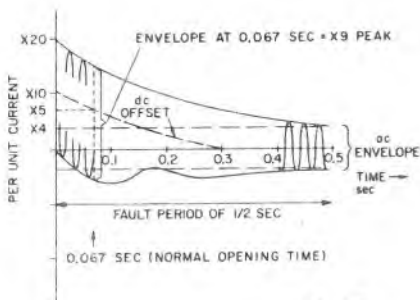
*69-kV model of Table 7, 5-km length.

Results of Cryogenic Study of 3000-MVA Ribbon Line*

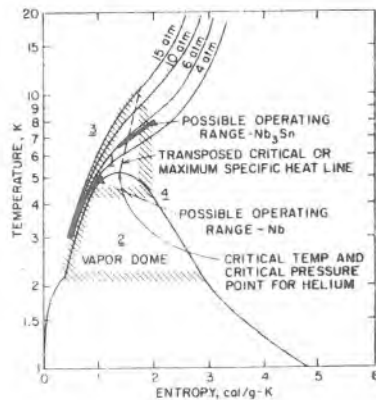
Temperature range of conductor, K	10-atm Inlet pressure					15-atm Inlet pressure				
	Total ΔT , go and return, K	Total pressure drop, atm	Mass flow rate, g/sec	MVA g/sec	Δh , J/g	Total ΔT , go and return, K	Total pressure drop, atm	Mass flow rate, g/sec	MVA g/sec	Δh , J/g
4.2- 6.2	2.31	0.04	536	5.60	8.58	2.35	0.04	618	4.85	7.44
6.2- 8.2	2.30	0.02	317	9.46	16.89	2.28	0.03	457	6.57	11.72
8.2-10.2	2.32	0.03	349	8.60	18.78	2.29	0.03	389	7.71	16.85
10.2-12.2	2.22	0.10	559	5.37	15.75	2.22	0.07	547	5.49	16.10

*69-kV model of Table 7, 5-km length. See Table 10 for details of losses and refrigerator power requirements.

Sl. 16



Sl. 17



Sl. 18

Ivan Ivanković, dipl.ing.
ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT
"RADE KONČAR" - Zagreb

IZOLACIJA SUVREMENIH TRANSFORMATORA NAJVIŠIH NAPONA

Rješenje sistema izolacije transformatora predstavlja sintezu nekoliko elemenata koje je potrebno istraživati. Jedan je odredjivanje naponskih stanja u izolaciji kod impulsnih napona narinutih na namote transformatora, koje se provodi analitički uz pomoć digitalnih računala. Slijedeći je element odredjivanje dielektričkih naprezanja u izolaciji. Za relativno složeni raspored elektroda i izolacije najprikladniji je račun polja pomoću metode izvora. Dielektričke karakteristike i dozvoljena dielektrička naprezanja korištenih izolacionih materija pri kratkotrajnim i dugotrajnim dielektričkim opterećenjima odredjuju se eksperimentalno modeliranjem pojedinih karakterističnih dijelova izolacionog sistema.

INSULATION OF MODERN HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS

The design of the insulation system for transformers results from the synthesis of several elements that have to be investigated. One of them is the determination of voltage conditions within the insulation at impulse voltages applied to the transformer windings. These are calculated analytically by means of digital computers. The next element involves calculating dielectric stresses within the insulation. The calculation of the field by the method of particular charges has proved suitable for rather complicated arrangements of electrodes and insulating parts. The dielectric characteristics and permissible dielectric stresses of the used insulating materials during short and long-lasting dielectric stresses are determined by experimental characteristic parts of the insulation system.

1. Uvod

Izolacija treba pouzdano razdvajati pojedine dijelove transformatora za sve vrijeme životne dobi. U pogonu je izložena djelovanju električkih, mehaničkih, termičkih i kemijskih utjecaja. Pored zahtjeva da u tim uvjetima sačuva potrebne dielektričke karakteristike, traži se takva izvedba izolacije koja će dati što nižu cijenu transformatora. Da bi se realizirali ovi zahtjevi, posebno izraženi kod najviših napona, uz pouzdanost i niske troškove, potreban je čitav niz istraživanja: dielektričkih naprezanja i karakteristika, procesa starenja u pogonskim uvjetima, primjene novih izolacionih materijala i tehnološkog procesa obrade da bi se dobila i sačuvala određena dielektrička svojstva. Ovdje ćemo se zadržati na dielektričkim prilikama u transformatoru.

Provjera dielektričke otpornosti transformatora na prenapone koji se javljaju u pogonu, provodi se pomoću standardiziranih ispitnih napona određenih nivoa za svaki naponski red. Danas se ispitivanja provode izmjeničnim i udarnim naponom, a tendencija je da se za najviše napone uvedu ispitivanja sklopnim i udarnim naponom i mjerenje parcijalnih izbijanja.

Da bi se projektirao sistem izolacije potrebno je istražiti nekoliko područja kao:

- naponska stanja u transformatoru pri udarnim naponima,
- dielektrička naprezanja u izolaciji,
- karakteristike izolacije.

Tek šire provedena istraživanja omogućavaju da se projektira optimalni sistem izolacije, koji ispunjava zahtjeve za pouzdanošću uz minimalne troškove.

2. Odredjivanje naponskih stanja

Da bismo mogli odrediti električka polja u izolaciji potrebni su nam potencijali pojedinih dijelova namota u transformatoru. Pri ispitivanju stranim naponom, narinuti je napon na svim točkama priključenih namota. Kod induciranoeg izmjeničnog napona uzima se linearna raspodjela napona po zavojima. Udarni napon, kao

što je poznato, raspodjeljuje se neravnomjerno po namotu i medju namotima, a raspodjela se mora posebno odrediti. Danas se prelazna stanja pri narinutim udarnim naponima određuju uglavnom analitički. Kod nas se primjenjuje određivanje prenapona u namotu i medju namotima višenamotnih transformatora pomoću računa prelaznih stanja u nadomjesnim krugovima. Dio namota, u kojem se raspodjela može smatrati linearnom, nadomješta se vlastitim kapacitetom, induktivitetom i otporom te međukapacitetima i medjuinduktivitetima sa svim ostalim dijelovima. Račun ovih parametara je posebno razradjen. Vlastiti kapaciteti se određuju pomoću geometrijskih kapaciteta izmedju zavoja i svitaka uz uvjet da je unutar elementa linearna raspodjela napona. Induktivitete određujemo pomoću rasipnih induktiviteta koji se računaju preko magnetskog polja u prozoru transformatora.

Sistem diferencijalnih jednačbi, koji opisuje stanja u nadomjesnim krugovima, rješava se direktnom metodom ili preko vlastitih vrijednosti matrica sistema. Na taj način dobijemo vremenski tok napona na pojedinim dijelovima izolacije ili samo maksimalne vrijednosti tih napona, koji su potrebni za račun električnog polja i usporedbu dozvoljenih i stvarnih naprezanja izolacije.

Račun parametara i račun prenapona eksperimentalno je provjeravan za nekoliko karakterističnih rasporeda i izvedbi namota. Ovako razradjen račun omogućava, osim navedenog, da se analiziraju razni geometrijski rasporedi i razne izvedbe namota i nadju takvi parametri koji daju najpovoljnije napone, koji će zahtijevati najmanje izolacije. Analize se redovito provode kod regulacionih transformatora i regulacionih autotransformatora. Takvi su npr. bili autotransformatori 300 MVA - $400_{+2 \times 2,5\%}/115$ kV i 400 MVA - $400_{+5\%}/231$ kV za jugoslavensku 400 kV mrežu. Na slikama 1. i 2. dan je vremenski tok napona izmedju dvije točke u transformatoru, dobiven računom i mjerenjem.

3. Odredjivanje električkog polja

Slijedeći korak pri definiranju izolacionog sistema transformatora je određivanje električkih naprezanja u izolaciji. Radi se o relativno složenom obliku i rasporedu elektroda, a medjuprostor je redovito ispunjen s dva ili više dielektrika. Zbog jednostavnijeg i bržeg računa polja, raspored se obično unekoliko pojed-

nostavni i zadaća svede s trodimenzionalne na dvodimenzionalnu u cilindričnom sistemu. Pri tom se nastoji pojednostavniti raspored tako da račun ne daje manje vrijednosti od realnih. Redovito se izdvaja nekoliko karakterističnih rasporeda u transformatoru kao: krajevi namota i jaram jezgre, ulazni dio namota i prvi aksijalni kanali, izolirani izvodi iz namota bilo na kraju ili u sredini namota, izolirani izvodi prema kotlu i namotu i slično, pa se postavlja račun napreznja u okolnom prostoru.

Ovakve zadaće moguće je opisati bilo Laplaceovom diferencijalnom jednadžbom bilo sistemom integralnih jednadžbi, koje zadovoljavaju naboji na elektrodama i polarizacioni naboji na granicama različitih dielektrika. Odlučili smo se na pristup preko integralnih jednadžbi. Broj potrebnih nepoznanica je u tom slučaju bitno manji, jer integralne jednadžbe povezuju samo točke u kojima postoje izvori polja, dok diferencijalne opisuju čitav prostor. Uistinu dobijemo punu matricu sistema. Pristup preko integralnih jednadžbi omogućava dalje jednostavnije zadavanje ulaznih podataka koji opisuju geometriju sistema. Omogućeno je također da se rješavaju prostori s više dielektrika i kod toga se integralne jednadžbe polarizacionog naboja brzo rješavaju iterativnim postupkom.

U nizu slučajeva pokazalo se vrlo pogodnim rješavanje polja metodom nadomjesnih naboja smještenih unutar elektrode ili oko granice dielektrika. Relativno složeni rasporedi kao izolirani izvodi iz namota rješavaju se prikladnim razmještajem prstenastih, točkastih i kratkih linijskih naboja. Provedene su analize i nadjeni takvi rasporedi naboja da je greška u računu polja i potencijala u izolaciji minimalna. Metoda omogućava da se s relativno malim brojem nepoznanica dobije zadovoljavajuća točnost računa, posebno na mjestima gdje je polje najveće. Na slikama 3. i 4. dana su dva primjera rasporeda na izračunatim ekvilinjama.

4. Karakteristike izolacije

Kao izolacija transformatora za najviše napone koristi se ulje i papir, s tim da u većem dijelu prostora ulje nosi dielektrička naprezanja, a papir dijeli uljne prostore na manje, koji imaju veća dozvoljena naprezanja. Dielektričke karakteristike izolacionih materijala određujemo eksperimentalno na većem broju uzoraka,

dovoljnom da dobijemo pouzdane vrijednosti dozvoljenih naprezanja. Potrebne su nam karakteristike kod kratkotrajnih naprezanja, koja nastaju pri udarnom i sklopnom naponu kod izmjeničnog napona kraćih i dužih trajanja, koja se javljaju pri ispitnom i pogonskom naponu. Odredjujemo zatim razinu naprezanja do koje nema parcijalnih izbijanja.

Karakteristike odredjujemo na modelima izolacionog sistema. Redovito se izdvaja karakteristični dio sistema koji se modelira. Na primjer, dio između namota, dio neposredno uz namot, zatim oko krajeva namota, oko izvoda i slično (slike 5. i 6.). Utvrđuju se, ustvari, dozvoljena polja ovisno o dimenzijama izolacije za nekoliko karakterističnih oblika polja.

Nastoji se dobiti jednostavniji model u kojem moraju biti sačuvani svi utjecajni elementi, a to su ponekad i detalji konstrukcije. Izrada i tehnološka obrada modela provodi se pod istim uvjetima pod kojima se rade transformatori. Pored toga, posebno se istražuje utjecaj pojedinih elemenata pripreme na dielektričke karakteristike da se pronadje optimalni postupak i što bolje karakteristike.

Prilikom projektiranja sistema izolacije dozvoljene vrijednosti naprezanja se uspoređuju s izračunatim vrijednostima polja na svim dijelovima izolacije.

5. Sistem izolacije

Rješenje sistema izolacije predstavlja sintezu prije navedenih elemenata, primjenjenu na sve dijelove izolacije transformatora. Uvijek se nastoji da izolacija, sastavljena od nekoliko komponenata, bude dielektrički opterećena što ravnomjernije i podjednako u odnosu na dopuštena dielektrička naprezanja za promatrani dielektrik.

Postizanje ovog cilja provodi se u nekoliko etapa, pri čemu se prvobitno projektirani raspored i elektroda i izolacije postepeno korigira dok se ne postigne zadovoljavajuće rješenje.

Bilo je uobičajeno da se iza toga radi model čitavog sistema u naravnoj veličini i provjeri čitav sistem prije primjene u transformatoru. Danas se u istraživačkom radu sve više napušta modeliranje čitavog izolacionog sistema ako su

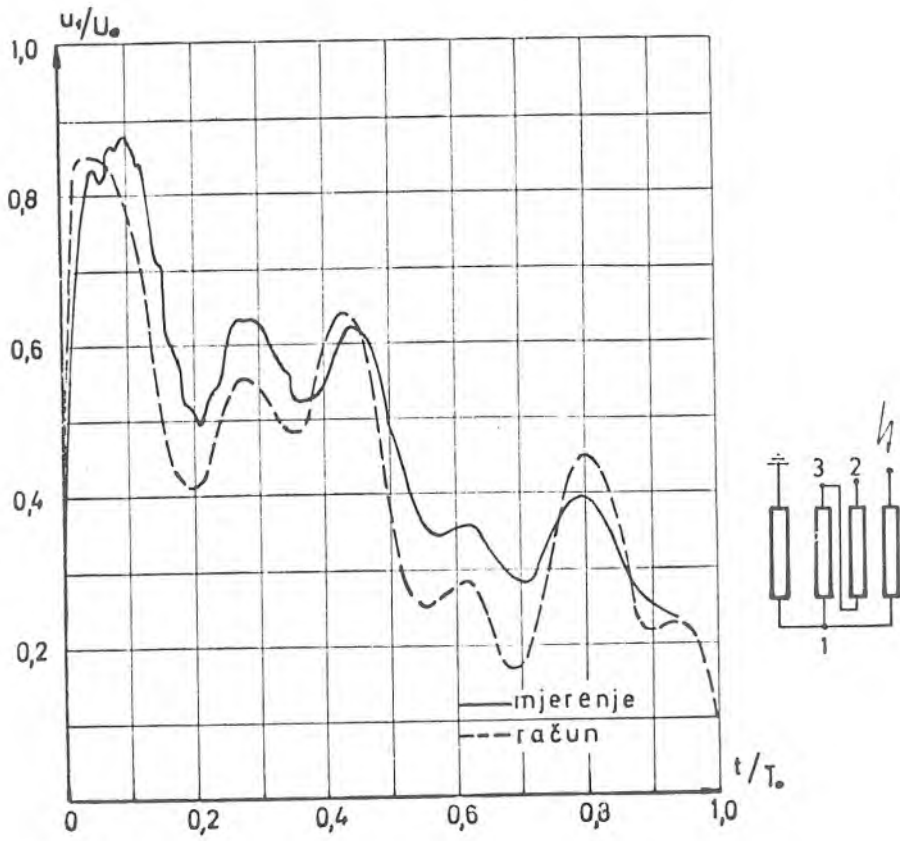
prethodno istraživani elementi, jer su takvi modeli preskupi, posebno za najviše napone.

Prilikom rješavanja sistema izolacije nužno je voditi računa o nizu drugih faktora. Izolacija je podvrgnuta mehaničkim naprezanjima koja izazivaju sile u transformatoru, jače pri kratkom spoju. Zatim se nastoji rasporedom izolacije omogućiti brže sušenje u procesu izrade kao i dobru cirkulaciju ulja radi hlađenja protjecanih dijelova transformatora.

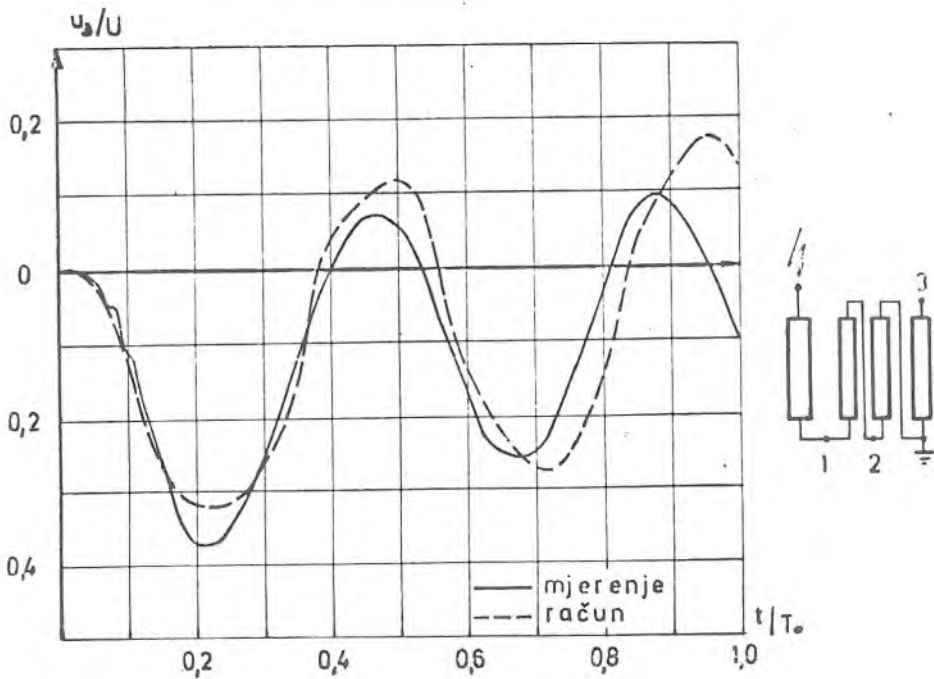
Kod nas je, prema navedenim principima, razradjen sistem izolacije za stupnjeve izolacije od Si 72,5 do Si 420 i za karakteristične tipove transformatora kao blok, regulacioni i autotransformator. Rješenja se primjenjuju pri gradnji transformatora. Radovi na istraživanju izolacije se nastavljaju s ciljem da se dobiju poboljšanja postojećih rješenja, bilo primjenom novih i kvalitetnijih izolacionih materijala, bilo točnijim poznavanjem prilika u transformatoru i karakteristika materijala, bilo usavršavanjem tehnoloških postupaka obrade materijala.

6. Literatura

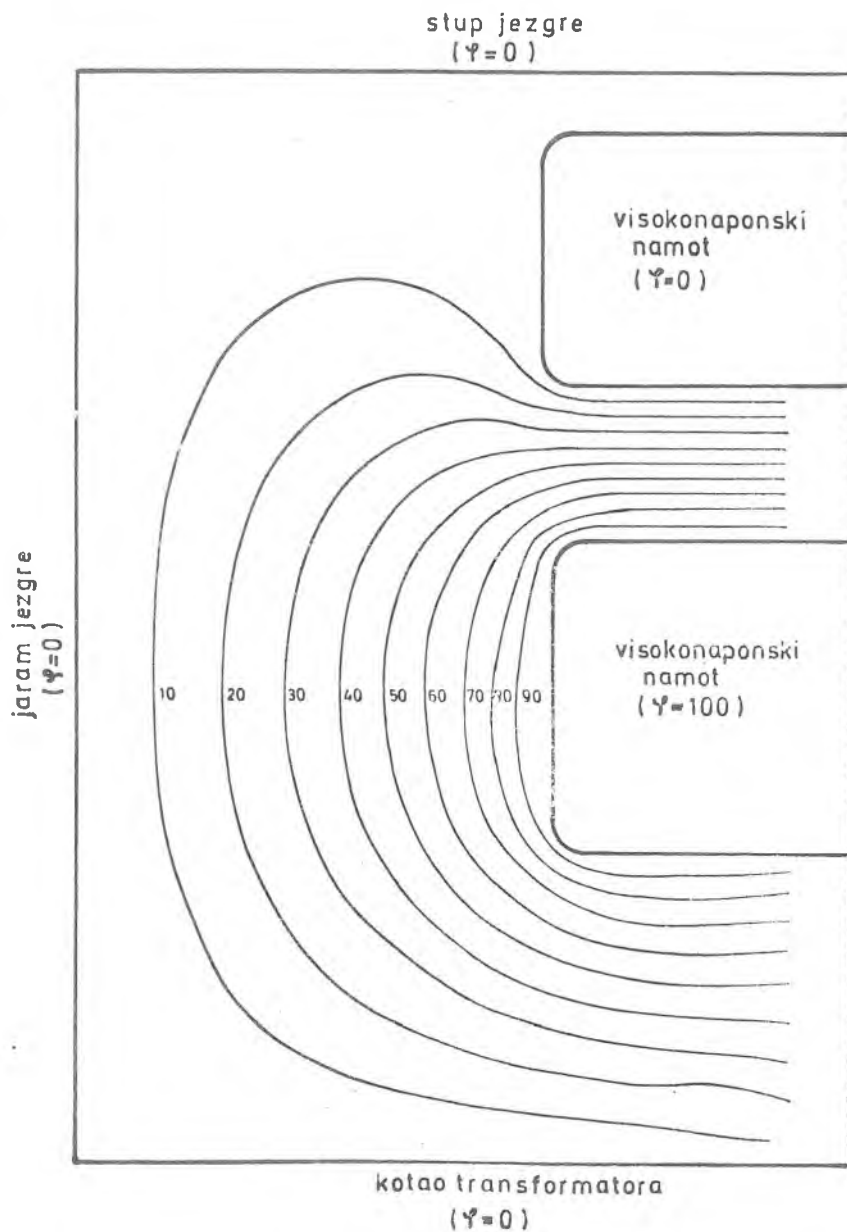
1. Febber W., Preininger G.: Probleme beim Bau grosser Spartransformatoren (Elin-Zs. 1974. H.3)
2. Ivanković I.: Prenaponi u autotransformatoru 400/115 kV (JUNAKO CIGRE, XII str. savjetovanje, 1975.)
3. Ivanković I.: Prenaponi medju namotima transformatora (Elektrotehnika br. 3, 1975.)
4. Müller W.: Numerische Berechnung der raumlichen und zeitlichen Spannungsverteilung in Transformatorwicklung bei Strossvorgängen (Inter. Symposium Hochspannungstechnik TU München, 1972.)
5. Panov A.V., Morozova T.I.: Električeskie harakteristiki i metodika rasčota glavnoj izoljacii mošćnih visokovoltnih transformatorov (Voprosi transformatorstrojenija - Trudi VEI - 79, Moskva 1969.)
6. Preininger G.: Die Berechnung der Stossspannungsbeanspruchung von Transformatoren mittels Digitalrechner (Elin - Zs. 1969, H. 1/2).



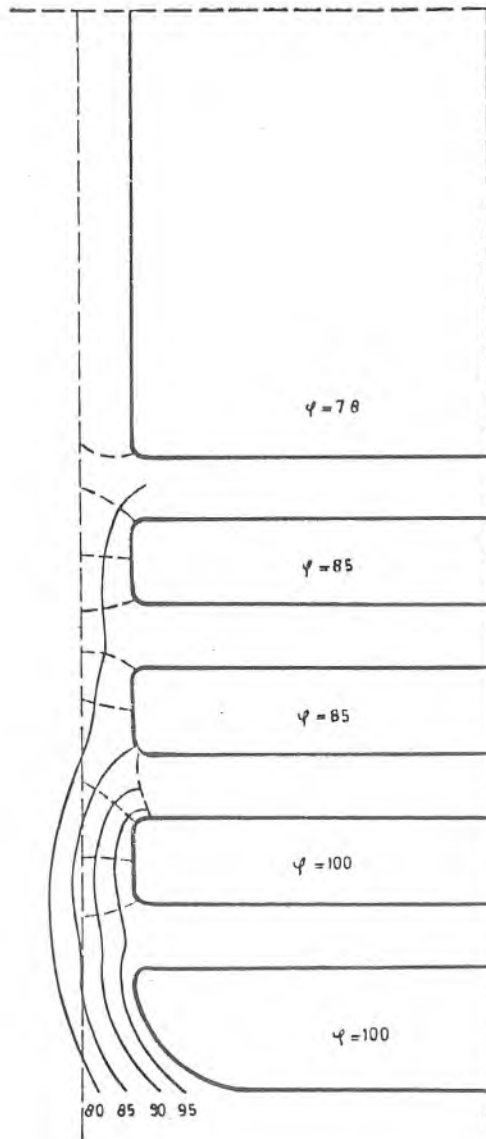
Slika 1. Računati i mjereni vremenski tok napona točke 1 prema zemlji



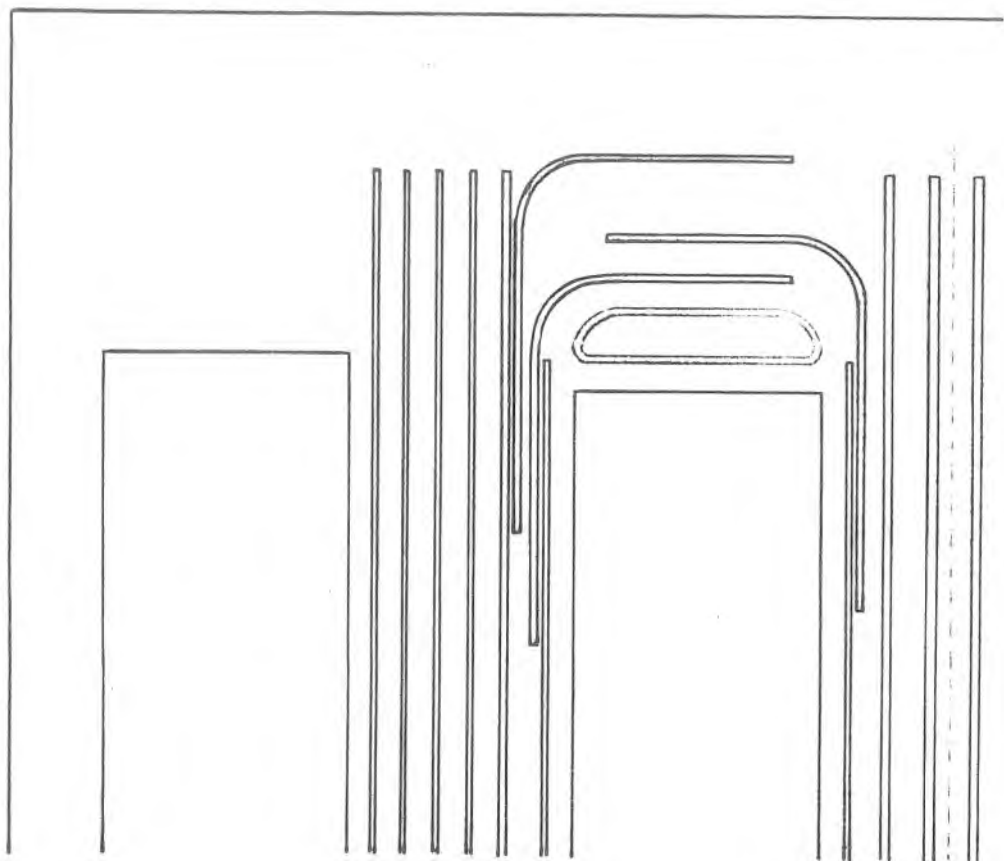
Slika 2. Računati i mjereni vremenski tok napona točke 3 prema zemlji



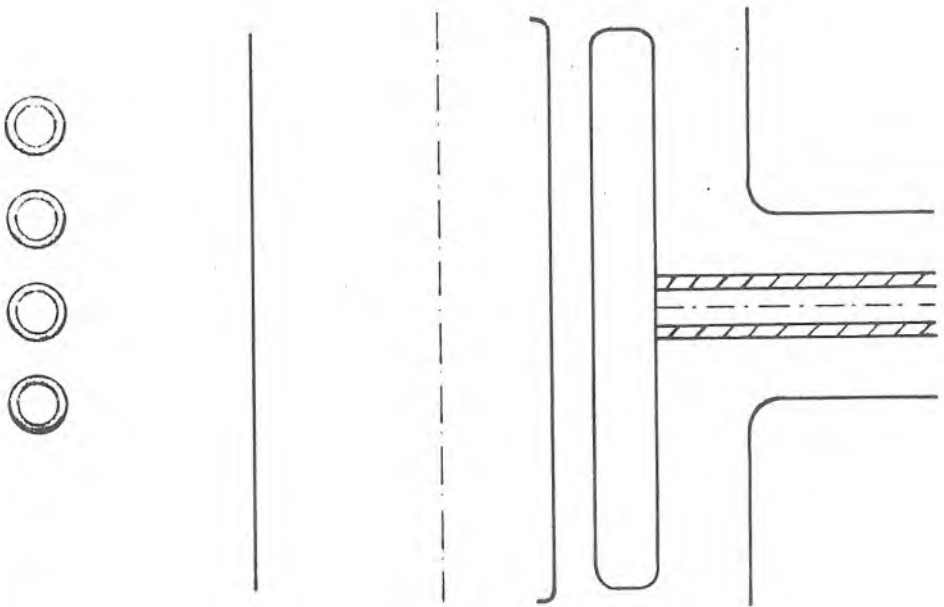
Slika 3. Izračunate ekvilinije na kraju namota



Slika 4. Izračunate ekvilinije uz namot

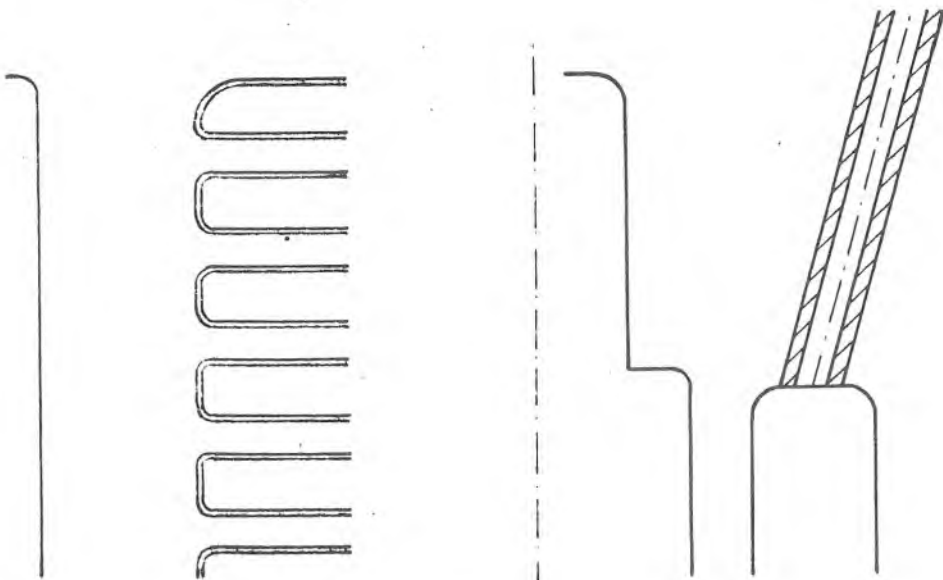


Slika 5. Raspored na kraju namota transformatora



a)

b)



c)

d)

Slika 6. Nekoliko karakterističnih rasporeda u transformatoru

Pavle Jovanović,
Elektrotehnički fakultet, Sarajevo

O MOGUĆNOSTIMA SVJETSKOG SISTEMA ZA PROIZVODNJU I PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

Razmatraju se mogućnosti za obezbjeđivanje potrebnih količina električne energije u daljoj perspektivi i svjetski sistem za njihovu proizvodnju i prenos. Postavljanjem tri velika vještačka satelita na 38.000 km od zemlje, koji bi bili relativno nepokretni u odnosu na Zemlju, dobile bi se platforme u svemiru na koje treba u dvije faze za bližu i dalju perspektivu da se izgrade stanice ogromnih snaga za snabdjevanje čitavog svijeta električnom energijom. U prvoj fazi mogli bi se koristiti magnetohidrodinamički generatori za direktno dobivanje električne energije iz toplote, a u drugoj fazi ovi bi bili zamijenjeni uređajima za kontrolisanu termonuklearnu fuziju. Sa ovih stanica maserima i laserima energija bi bila upućivana na Zemlju u određene tačke, gdje bi se vršilo njeno pretvaranje i distribucija električne energije do svih tačaka na Zemlji.

WORLD-WIDE SYSTEM OF ELECTRIC POWER PRODUCTION AND DISTRIBUTION

The provision of required amounts of power in the future, and a world-wide system of power production and distribution, are discussed.

By placing three huge satellites in orbit 38.000 km above the Earth, revolving at the same speed but in the opposite direction, the necessary platforms would be obtained for the construction /in two stages, for the near and more distant future/ of stations of huge capacities for the world-wide supply of power. The first stage might use magnetic-hydrodynamic generators which would produce electric power directly from thermal energy; in stage two these would be replaced by units for controlled thermonuclear fusion. Masers and lasers would be used to convey power to specific points on the Earth, where it would be converted and distributed all over the world.

1. U v o d

Problem dovoljnih i jeftinih količina energije u prvom redu električne i koju bi bilo moguće transportovati do svih tačaka na Zemlji i staviti je na raspoloženje pod istim uslovima svim ljudima svijeta, postala je, a u budućnosti biće još neophodnija komponenta, ne samo razvoja čovječanstva već i vitalno pitanje održavanja civilizacije i opstanka ljudi. Naftna kriza posljednjih godina pokazala je moguće posljedice neobezbjedivanja energije za privredu i standard ljudi u cijelom svijetu.

Konvencionalni izvori za proizvodnju i prenos energije koji su sada u upotrebi ili koji će stajati na raspoloženju za slijedećih 20-30 godina, ne pružaju još mogućnost niti otvaraju perspektivu stvarnog tehničkog rješenja za proizvodnju električne energije po višestruko nižoj cijeni od sadašnje, a više dese-

tina i stotina puta većih količina električne energije, u daljoj budućnosti za slijedeće stoljeće i još dalje.

Također ni sada upotrebljeni sistemi prenosa električne energije naizmjeničnim strujama, ne omogućavaju zbog poznatih razloga stabiliteta prenos energije dalekovodima na više hiljada ili deseti-na hiljada kilometara, tj. isključuju mogućnost interkontinentalnog prenosa električne energije. Također, ni sistem prenosa jednosmjernim strujama vrlo visokim naponima (koji su sada još u eksperimentalnoj fazi), zbog tehničkih problema i cijene ne daju nadu da je ovo pravo rješenje pogotovo za dalju budućnost.

Kako do sada poznati izvori za proizvodnju električne energije (uključujući i atomsku energiju) ne mogu zadovoljiti potrebe za dalju i daleku budućnost, to je potrebno tražiti nove puteve i mogućnosti za ovaj vitalni problem čovječanstva.

2. O izvorima i prenosu električne energije u budućnosti

Prema sadašnjem stanju nauke i tehnologije i perspektivi, koja se za sada može predviđjeti u pogledu glavnih izvora za proizvodnju električne energije u budućnosti, došlo bi u obzir:

- a) kontrolisana termonuklearna fuzija vodonikovih izotopa u helijum
 - b) direktno korišćenje energije sunca,
- dok bi ostale mogućnosti i izvori bili marginalni i lokalni.

U pogledu proizvodnje električne energije novi kvalitet u tehnologiji ove oblasti bi bilo prevazilaženje posrednog ciklusa za proizvodnju električne energije koja se sada primjenjuje pri proizvodnji iz čvrstih, tečnih i gasovitih goriva i uvođenja postupaka za direktno dobivanje električne energije iz toplote i time i povećavanje stepena iskorišćenja sa sadašnjih oko 40% (kod savremenih elektrana) na oko 90% i više u daljoj perspektivi kod direktnih postupaka.

Kako je sada vjerovatnije, ako se nešto nepredviđeno i revolucionarno u međuvremenu ne desi, da se najprije primijeni u prvoj fazi u bližoj perspektivi, za ove svrhe magnetnohidrodinamički sistem za direktnu konverziju električne energije; a u drugoj

fazi u daljoj perspektivi tehnički primijeni kontrolisana termonuklearna funkcija. Ona bi trebala da postane jedan od dva glavna izvora za direktno dobivanje električne energije i time bi se sa novim sistemom prenosa električne energije dobilo rješenje problema i za daleku budućnost za dobivanje i prenos električne energije na zemlji.

Prenos električne energije u tako ogromnim količinama i do svake tačke na zemlji, moći će biti ostvaren u budućnosti također na potpuno nov način. On će biti bežičan (glavni magistralni vodovi energije), i ostvarivao bi se bilo laserima ili maserima, bilo visoko koncentrisanim elektronskim snopovima vrlo visokih napona do određenih tačaka na zemlji (glavni distribicioni centri), odakle bi se pružila lokalna (zemaljska) distribucija električne energije.

3. Svjetski centri za proizvodnju električne energije

Ovakvi visoki zahtjevi u pogledu količina, tehničkog nivoa, ekonomičnosti i tehnologije prenosa električne energije, kao i ekoloških uslova na okolinu, zahtijevaju u skladu sa izloženim i nov prilaz u lociranju i funkcionisanju ovog sistema budućnosti za proizvodnju i prenos električne energije.

Cjelokupna globalna količina električne energije za čitav svijet bila bi proizvođena u tri gigantska svemirska centra koji bi se nalazili na vještačkim satelitskim platformama na visini od 38.000 km. One bi se kretale istom brzinom ali u suprotnom smjeru od Zemlje, te bi bile nepokretne u odnosu na nju, a istovremeno bi svojim položajem pokrivale sve tačke na Zemlji. Energija proizvođenja u ovim centrima, laserskim odnosno maserskim zracima bi bila transportovana u određene prijemne stanice na Zemlji, ovdje bi se pretvarale u naizmjenične struje industrijske ili vrlo visoke frekvencije ili jednosmjerne struje i zatim bi se konvencionalnim putem u talasovodima razvodile do potrošača.

Kao najpogodnije gorivo za kontrolisanu termonuklearnu fuziju je smjesa izotopa vodonika deuterijuma i tricijuma. Deuterijum se nalazi u običnom vodoniku u 0,015%, dok se tricijum danas

dobiva iz vode koja cirkuliše u atomskim reaktorima. Dok se kod konvencionalnih procesa hemijskog sagorjevanja pretvara oko 10^{-7} procenata mase, a kod fisije tj. cijepanja teških jezgara ona ne prelazi 0,1% mase, pretvaranje mase u energiju dostiže 1% od kontrolisane termonuklearne fuzije.

Ali za spontani proces fuzije, kao što je poznato, neophodne su i ekstremno visoke temperature reda 10^8 °C. Laboratorijski se danas znatno približilo ovoj granici. Treba očekivati da će laboratorijski biti riješeni svi problemi kontrolisane termonuklearne fuzije do kraja ovog stoljeća, dok bi se do sredine 21. vijeka mogla da ostvari tehnička primjena u širokim okvirima, pošto je prethodno potrebno riješiti niz naučnih tehničkih problema, da bi se dobili novi moćni i jeftini sistemi za proizvodnju i prenos električne energije.

Još jedna od prednosti termonuklearnih fuzionih izvora energije je njihova čistoća. Organskih zagađivača uopšte nema, dok su potencijalni radioaktivni zagađivači znatno manje opasni i prisutni u znatno manjoj mjeri no kod fisionih (atomskih) nuklearnih elektrana.

Generatori i ostale električne mašine i uređaji za pretvaranje električne energije u mehaničku i obratno na ovim svemirskim stanicama u uslovima gotovo apsolutnog vakuuma i apsolutne temperature daleko bi se ekonomičnije mogli da grade, koristeći mehaničku silu međusobnog dejstva električnog polja mjesto mehaničke sile međusobnog djelovanja magnetskog polja, koja se sada isključivo koristi.

4. Mehaničke sile u električnom polju

Kao što je poznato, sve vrste i tipovi električnih mašina, aparata i instrumenata koji su danas primijenjeni, koriste samo i jedino mehaničke sile međusobnog djelovanja magnetskog polja. Radi toga su potrebna glomazna i teška magnetna kola od feromagnetnih materijala, kojima se vodi magnetni fluks, i koji čine veći dio težina električnih mašina.

Mehanička sila međusobnog djelovanja u magnetskom polju izražena preko energije magnetskog polja W_m u generalisanim koordina-

tama f jednaka je:

$$f_m = \frac{\partial W_m}{\partial g} \quad (1)$$

i matematička, potpuno simetrična odgovarajućem izrazu za mehaničku silu u električnom polju, izraženu preko energije električnog polja (W_e) i generalisane koordinate g :

$$f_e = \frac{\partial W_e}{\partial g} \quad (2)$$

Mehanička sila u električnom polju koja bi bila analogna i istog reda veličina kao i mehanička sila u magnetnom polju, za uslov istih unutrašnjih dimenzija (korisnih površina mašine), dobiva se iz uslova:

$$\frac{\partial W_e}{\partial g} = \frac{\partial W_m}{\partial g} \quad (3)$$

Kada se želi postići jednakost za uređaje, koji se zasnivaju na principu međusobnog dejstva električnog polja i za uređaje koji se zasnivaju na principu dejstva magnetnih polja, to za slučaj jednakih pomjeraja dg moraju biti iste promjene energije električnog i magnetnog polja $dW_e = dW_m$, a za slučaj istih radnih površina moraju zapreminske veličine električnog i magnetnog polja da budu iste:

$$\frac{BH}{2} = \frac{DE}{2} \quad (4)$$

Za vakum je:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \quad (5)$$

odnosno:

$$\frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (6)$$

Za mehaničku silu u električnim mašinama i uređajima, čija je magnetna indukcija $B = 1T$, ista mehanička sila u električnom polju zahtijeva jačinu električnog polja prema jednačini (6):

$$E \sim 3 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$$

Takva jačina električnog polja može se postići u idealnom vakumu

ali i tada dolazi do vrlo izražene autoelektronske emisije, pa je potrebno radi toga smanjiti jačinu električnog polja na $E \leq 5 \cdot 10^5$ V/cm.

Gornja jačina električnog polja $E = 3 \cdot 10^6$ V/cm je dobivena pod uslovom istih korisnih površina ove mašine. Kako se, međutim, površina mašine u električnom polju može višestruko da poveća uz iste spoljne dimenzije, to znači da se za iste spoljne dimenzije može dobiti mašina iste i veće snage ali mnogostruko lakša, koristeći efekat električnog polja, no što je mašina koja koristi efekat mehaničkih sila magnetnog polja. Ovo radi toga što električnom polju nisu potrebna magnetna kola za vođenje fluksa vektora D, niti provodnici, dovoljna je samo metalna folija mjesto provodnika, pa je takva mašina mnogostruko lakša (više desetina puta).

Teorijski, odavno je bila poznata mogućnost korištenja mehaničkih sila u električnom polju za konstrukcije električnih uređaja i mašina, ali za tehničku primjenu bio bi zbog jakih električnih polja u sematskim uslovima potreban vrlo visoki vakuum za ovakve jačine električnog polja.

A u našim tehnološkim uslovima njegovo stvaranje i omogućavanje bilo bi neekonomično i skupo.

U svemirskim uslovima, situacija je potpuno izmijenjena. Apso-lutni vakuum i temperatura stoje nam besplatno na raspoloženju, pa su za takve uslove mnogo pogodnije i jeftinije električne mašine i uređaji koji bi koristili efekat mehaničkih sila u električnom polju.

Enormno smanjivanje težine generatora električnih mašina i uređaja koje pruža korištenje mehaničkih sila električnog polja postaje izuzetno značajan i jedan od odlučujućih faktora za ekonomičnost svemirskih stanica za proizvodnju električne energije i druge aktivnosti u vasioni.

5. Neki ekonomski, društveni i ekološki aspekti svjetskih stanica i sistema za proizvodnju i prenos električne energije

Ostvarivanjem ovakvog globalnog sistema za proizvodnju i prenos, jeftina električna energija bi pod istim uslovima bila do-

stupna svim zemljama svijeta. Ovakva proizvodnja mogla bi da dovede i do krupnih društvenih pojava i odnosa između zemalja, do stvaranja ravnopravnijih i pravednijih odnosa itd.

S druge strane, koncentracijom glavnih izvora za proizvodnju energije visoko u svemiru dobivaju se posebne pogodnosti sa ekološkog stanovišta. Zagađivanje okoline, koje danas stvaraju elektrane na hemijska i atomska goriva, na ovaj način se u potpunosti rješava. Osim toga, mogući incidenti i teške havarije, koje bi kod atomskih elektrana mogle da izazovu teške posljedice po okolinu, na ovaj način bi bile i velikoj mjeri otklonjene, a štete na zemlji neznatne.

Z a k l j u č a k

Dakle, potreba za električnom energijom u svijetu u bližoj i daljoj budućnosti, a po znatno jeftinijoj cijeni, ne omogućavaju ni konvencionalna goriva pa ni atomske elektrane zbog ograničenih resursa fosilnih i fisionih goriva. Također, ni sadašnji sistem prenosa električne energije naizmjeničnim strujama ne može da ostvari ni interkontinentalni prenos energije, niti može da je prenosi na više hiljada kilometara ni u količinama od više desetina puta od sadašnje proizvodnje energije. Moraju se, dakle, tražiti nova naučna i tehnička rješenja koja će obezbijediti čovječanstvo električnom energijom u ogromnim količinama za dalju budućnost, što zahtijeva sasvim nove tehnologije i tehniku, a što će imati i značajne društvene i ekonomske posljedice.

B i b l i o g r a f i j a

1. P. Jovanović: Teorija elektroenergetskog polja, Sarajevo, 1972.
2. Nojman, Kalantarov: Teorijski osnovi elektrotehnike III, Naučna knjiga, Beograd, 1952.

Gojko Muždeka
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Bulevar Revolucije 73

PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE - JUČE, DANAS, SUTRA

U referatu se prvo daje osvrt na začetak prenosa električne energije krajem prošlog stoleća, s posebnim akcentom na Teslin doprinos razvoju polifaznih sistema proizvodnje, prenosa i upotrebe električne energije. Opisuje se zatim dalji proces prerastanja prenosnih sistema u moćne trofazne elektroenergetske sisteme, integrisane u međunarodne celine, proces evolucije koji je značio tehničku i civilizacionu revoluciju.

Analiziraju se potom uslovi u kojima je prenos naizmeničnom strujom otežan, pa dolazi do reafirmacije prenosa jednosmernom strujom, ali umetnutog u trofazne sisteme. Daje se ocena budućeg razvoja i novih tehnika. Završava se s Teslinom idejom bežičnog prenosa električne energije.

ELECTRICAL ENERGY TRANSMISSION - YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

In the survey of the beginnings of electric power transmission at the turn of the century particular emphasis has to be placed upon Tesla's contribution to the development of polyphase systems in the production, transmission, distribution and use of electric power. Subsequently transmission systems developed into huge, internationally integrated electric power systems; it was this evolution that brought about the revolution in technology and civilization.

In some conditions AC transmission becomes difficult and DC solutions have partly been reasserted, however integrated into three-phase systems. Future developments are certain to result in new techniques. A fitting conclusion is provided by another of Tesla's ideas - the wireless transmission of electrical energy.

x x x x x x

Osnovna struktura savremenih elektroenergetskih sistema je trofazna (sinhrona) proizvodnja, prenos, distribucija, pa i, u širem smislu, upotreba električne energije. Ta osnovna struktura nije se menjala još od kraja prošlog stoleća. Činjenica koja sama po sebi najbolje govori o vrednosti rešenja. Idejni tvorac takvog rešenja bio je Nikola Tesla. O tome svedoči, možda jasnije od svih, njegov patent br. 390414, prijavljen 23. aprila 1888. godine. I pored toga se za Teslino ime najčešće vezuju bifazni sistemi, eventualno njihova opštija klasa, polifazni sistem. Razlog leži možda u činjenici što prvi ostvareni trofazni prenos Laufen - Frankfurt 1891. godine potiče od Dolivo - Dobrovolskog i Brauna, dok je kasniji (1895/96) trofazni prenos iz hidroelektrane na Nijagari, u čijem ostvarenju je sa firmom Vestinghaus učestvovao i N. Tesla, prvobitno realizovan sa dvofaznim mašinama i transformacijom po šemi Skota. Najmerodavnije je svakako ono što je napisao sam Braun (Brown C.E.L., Reasons for the use of the three phase current in the Lauffen - Francfort transmission - Electrical World, 1891, No. 19, str. 346): "Za trofaznu struju, iskorišćenu u Frankfurtu, mi dugujemo radovima g. Tesle, što se jasno vidi iz njegovih patenata".

Tesla se očigledno nije bavio pitanjem koji je od polifaznih sistema, koje je ponudio, optimalan sa gledišta celine: proizvodnje, transformacije i prenosa. Ne treba se onda čuditi što je prva proizvodnja u hidroelektrani na Nijagari bila sa dvofaznim generatorima, za koje se i danas može pročitati u literaturi (L.9) da su konkurentni trofaznim (po unutrašnjoj strukturi radi se u stvari o "četverofaznim mašinama").

Prodor trofaznih sistema je usko vezan za niz Teslinih patenata kojima je prethodila Teslina koncepcija obrtnog magnetnog

polja, potekla još iz budimpeštanskih dana 1882. godine, prva zamisao prostog beskoлектornog motora, kao i realizacija primitivnog modela električnog motora zasnovanog na principu toga polja (Strasburg, 1883. godine).

Kako po zamisli i konstrukciji ovoga motora, tako i po terminima prijave i prihvatanja patenata, Tesla je prednjačio ispred onoga što je u tom domenu eksperimentalno ostvario, javno izložio odnosno publikovao Feraris, o čemu se iscrpni uporedni podaci mogu naći u literaturi iz istorije elektrotehnike (L.3). Da ne govorimo o tome da su Tesline ideje značile drugi kvalitet (Blondel, L.2) i da je Feraris čak pogrešno pokušavao da dokaže da elektromotor, zasnovan na principu obrtnog magnetnog polja, neće naći energetsку primenu zbog niskog stepena korisnog dejstva (L. 3). Istina, treba priznati da su osnovne ideje u to vreme "visile u vazduhu", što ni najmanje ne umanjuje Tesline zasluge.

Eto tako je konačno, zahvaljujući pre svega seriji Teslinih senzacionalnih pronalazaka, naizmenična struja, u svom opštijem vidu polifaznih, posebno trofaznih struja, mogla brzo, efikasno i sistematski potisnuti dotle gotovo neprikosnovenu jednosmernu struju, čija je osnovna slabost bila što nije pogodna za naponsku transformaciju, i ograničiti njenu primenu na specijalne svrhe.

S obzirom da savremeni "sinhroni" moćni elektroenergetski sistemi rade sa jednom odredjenom učestanošću (50 Hz odnosno u SAD i još nekim zemljama ili njihovim delovima, na primer Japanu, 60 Hz), jasno je od kolikog je bilo značaja od početka njihovog razvoja izvršiti dobar izbor učestanosti. Manje je poznato da je Tesla i tu odigrao veliku ulogu, jer je uspeo da ubedi inženjere Vestinghausa, da od u to vreme povoljnije učestanosti 133 Hz, predju na primenu 60 Hz. Pri današnjem stanju razvoja elektro -

energetskih sistema smatra se da je najoptimalnija učestanost sa gledišta celine sistema negde izmedju 50 i 60 Hz.

Dalji razvoj elektroenergetskih sistema značio je evoluciju koja je izvršila tehničku i civilizacionu revoluciju u svetu. O tome najbolje svedoči tabela br. 1 (L.6), iz koje se vidi koliko je bio brži porast proizvodnje električne energije u odnosu na porast potrošnje energije uopšte, a pogotovo u odnosu na porast broja stanovnika. Iz tabele je takodje vidno da treba očekivati u budućnosti nešto sporiji tempo rasta potrošnje električne energije, s obzirom da ona učestvuje sa sve većim procentom u ukupnoj potrošnji energije, koja je uvek imala nešto sporiju dinamiku.

Razvoj potrošnje električne energije diktirao je izgradnju izvora, prenosne i distributivne mreže, što je značilo prerastanje klasičnog usmerenog sistema izvor-prenos-centar potrošnje u složene elektroenergetske sisteme. Integracijom u velike sisteme, koja prevazilazi granice pojedinih zemalja, dobilo se na ekonomiji, koristeći tzv. "efekt veličine", manje vršno jednovremeno opterećenje, snižene potrebe u rezervi, itd. Jedan od bitnih kvaliteta elektroenergetskih sistema (izuzev pretvaranja toplotne u mehaničku energiju) je izvanredno visok stepen korisnog dejstva, što je sa narastanjem snaga moglo da se ostvari samo superponiranjem sve viših napona, potrebnih i sa gledišta održanja dozvoljenih padova napona.

Veoma visoki naponi (380 kV i više) zaoštrili su problem korone, koji je, međjutim, rešen za sada pa i u doglednoj budućnosti rascepljenjem faznog provodnika na dva, tri i više provodnika (u perspektivi za izvanredno visoke napone do 6 provodnika, posle čega se sve više gubi efikasnost daljeg povećavanja broja, a jako usložnjava konstrukcija). Na ovaj način izbeg-

nute su i neprihvatljive veličine preseka provodnika za nadzemne vodove najviših napona, omogućena standardizacija preseka provodnika za više napona, povećane termičke granice (veća površina hladjenja u odnosu na zapreminu, koja je srazmerna Džulovim gubicima), povećane prirodne snage, a time i realna prenosna moć dalekovoda.

Superponiranje viših napona uz postepeno potiskivanje nekih nižih naponskih nivoa olakšava sve akutniji problem koridora za vodove.

Dosadašnja lokacija izvora odnosno elektrana bila je uglavnom vezana za izvore energije (vodne snage odnosno ugljenokope), a kod termoelektrana i za blizinu vode za hladjenje. Mada se kod nuklearnih elektrana praktično gubi zavisnost od lokacije nalazišta "goriva", pojačava se potreba u vodi za hladjenje u odnosu na klasične termoelektrane. Ogromne količine vode potrebne za buduće nuklearne elektrane od više hiljada megavata može nezavisno od sušnog perioda da obezbedi more, tamo gde postoji, a rešenje sa tornjevima i bazenima je nužno u slučajevima kada nema boljih rešenja. Ipak, bez obzira na nešto veću fleksibilnost lokacije nuklearnih elektrana neće se bitno izmeniti potrebe u odgovarajućoj mreži za preuzimanje velikih snaga budućih izvora.

U pogledu dužina vodova najviših napona treba podvući dve glavne tendencije: dominantnu, koja znači efektivno skraćivanje prenosnih dužina sa vremenom (novi izvori, novi centri velike potrošnje) i izuzetnu, tj. registrovanje sve većih prenosnih udaljenosti, koje su dostigle i preko 1.500 km, što je karakteristično naročito u zemljama velikog prostranstva sa jeftinim izvorima energije, na primer vodnih snaga, bez bliskih potrošačkih područja.

U prvom slučaju se ima zaoštavanje problema velikih snaga kratkog spoja, koje zbog sve gušće mreže (smanjenje impedanse "kvara") rastu brže nego sa kvadratom napona, tj. relativno brže nego prenosne snage, pa je potrebno sekcionisanje mreža nad kojima je izvršeno superponiranje mreža višeg napona.

Druga tendencija, specifična samo za nekoliko zemalja u svetu, dovela je do reafirmacije prenosa jednosmernom strujom, ovog puta na najvišim naponima, ali u krilu trofaznih sistema, pomoću ispravljanja trofazne u jednosmernu struju a zatim inverzije. Akutni problem stabilnosti veleprenosa trofaznom strujom i izvanredno jak Ferantijev efekt povišenja napona u praznom kodu jako dugih vodova naizmenične struje, zahtevaju rešenje pomoću skupe redne i otočne kompenzacije, što kod dužina nadzemnih vodova reda 1.000 km (sa tendencijom na manje vrednosti) omogućuje prenosu jednosmernom strujom, umetnutom u trofazni elektroenergetski sistem, da i pored skupih ispravljačkih i invertorskih stanica na krajevima, zahvaljujući pre svega odsustvu potrebe za kompenzacijom kao i nižim zahtevima u pogledu izolacije, bude ekonomičniji od trofaznog.

Još je jedan veoma redak slučaj kada se jednosmerna struja na visokim naponima unutar trofaznog sistema pojavljuje umesto naizmenične. Radi se o prenosu kablovima, na za ovu skupu tehniku relativno velika rastojanja reda 50 km i više (podmorske veze, na primer ostrva sa kopnom, i sl.). S obzirom na desetine puta veće podužne kapacitete kablova u odnosu na nadzemne vodove, javljaju se veoma velike kapacitivne snage "punjenja" kablova, koje treba kompenzovati otočnim prigušnicama. Kako su kod jednosmernih kablova dozvoljene još i znatno veće jačine električnog polja pokazuje se da su izdaci za ispravljačke i invertorske stanice već kod navedenog reda dužine kabla kompenzovani uštedama na kablju i kompenzaciji.

Potpunosti radi, treba navesti još i primenu ispravljačkih i invertorskih stanica u slučaju povezivanja velikih trofaznih sistema, inkompatibilnih u pogledu regulacije učestanosti odnosno sa raznim nominalnim učestanostima delova sistema (Japan). Primena jednosmernih veza u trofaznim sistemima je dobro došla i sa gledišta ograničavanja snaga kratkog spoja, pa uz sticaj i drugih okolnosti (dužine kablova) može da prevagne na stranu umeštanja jednosmerne veze u trofazni sistem (London).

Eventualno povezivanje ostvarenih jednosmernih poteza u mrežu jednosmernog napona na najvišim naponima za sada je sputano teško rešivim pogodnim prekidanjem velikih jednosmernih struja visokog napona, potrebnih za selektivno diskontinualno isključenje deonice u kvaru (mada se nude neka palijativna rešenja, L.8), zatim dodatnim potrebama za ispravljačkim odnosno invertorskim stanicama kod novih međjupunktova, koji zapravo u nekim slučajevima mogu da znače ponovnu ekonomsku nadmoć trofaznog sistema.

Na kraju treba reći da je prisutno još i pitanje pouzdanosti ovih složenih ispravljačkih i invertorskih stanica.

Očigledno je iz gornjeg da je reafirmacija prenosa jednosmernom strujom ograničena na sasvim izuzetne slučajeve, pa i na veoma mali broj zemalja, i da ne ugrožava razvijene moćne trofazne elektroenergetske sisteme. Šta više, u nekim slučajevima još većih prenosnih udaljenosti, na dužine reda "polutalasnih", uslovi na krajevima trofaznog prenosa ponovo postaju povoljni, pa se i pored na primer nekih složenih problema (recimo relejne zaštite) može govoriti o ekonomskoj prednosti trofaznog prenosa nad jednosmernim (L.12).

U oceni novih tehničkih rešenja relativno malo se nudi na polju nadzemnih vodova. Za velike udaljenosti principiјelno je moguć tzv. "prenos po otvorenim vodovima", koristeći prirodnu

kapacitivnu spregu umesto veštačke redne kompenzacije, ali zbog zauzimanja znatno više prostora, pitanja eventualnih medjustanica, odudaranja od sadašnjih rešenja nema izgleda da se praktično primeni (L.11 i 13).

Takodje je predložen i teorijski razradjen i prenos tzv. "pulzirajućom strujom", koji predstavlja superpoziciju jednosmernog sistema na postojeće trofazne sistema, ali i pored izvesnih dobitaka u pogledu povećanja prenosne moći, ne vidi se da je opravdan, s obzirom na složenost i dodatne probleme koje sa sobom nosi, mada su neki autori izračunali da bi bio ekonomičan za nadzemni prenos u izvesnoj zoni prenosnih udaljenosti izmedju 1.000 i 2.000 km. (L.12).

Znatno veći broj mogućnosti nudi se na polju kablovske tehnike, naročito kada su u pitanju velike snage, koje će u budućnosti potrebovati centralni delovi najvećih gradova (već danas su npr. u nekim delovima Manhattan-a u New-York-u ostvarene daleko najveće površinske gustine opterećenja u svetu iznad 500 MW/km^2). U takvim slučajevima dolaze u obzir i uljni kablovi najviših napona hladjeni vodom, čime snaga prenosa možeda se više nego udvostruči, cevni vodovi sa gasom SF_6 kao izolacionim sredstvom, koji zahtevaju mnogo prostora, kao i supraprovodni kablovi koji sa umerenim naponima, u trofaznoj konstrukciji prihvatljivih dimenzija, omogućuju velike snage.

Radi uporedjenja tehničko-ekonomskih karakteristika dati su podaci o tim kablovima u tabeli 2 (L.5), paralelno sa onima za nadzemne vodove najviših napona i to za slučaj kratkih deonica oko gradova uz korišćenje do blizu termičkih granica, a lako je preračunati specifične cene prenosa električne energije po tim vodovima i za slučaj većih dužina, gde ekonomske snage ne odstupaju mnogo od prirodnih (cene su iz perioda pre energetske krize). Uporedjenje troškova prenetog kilovatčasa pokazuje da treba koristiti nadzemne

vodove najviših napona i na periferiji gradova sa dubokim uvodom sve dok je to moguće, jer kod najviših napona cere kablovskog prenosa su reda deset puta veće.

Dok se za sada može sagledati eventualna perspektivnost cevnog prenosa sa gasom kao izolatorom za jake veze između izvora i njihovih razvodnih postrojenja, naročito pri široj upotrebi SF₆ - postrojenja u velikim aglomeracijama, možda će superprovodni kablovi svojom kompaktnošću dobiti primenu za duboki kablovski uvod u centre velikih gradova visoke gradnje objekata već krajem ovog stoleća. Ta tehnika donosi sa sobom okretanje od problema najviših napona ka problemima velikih struja i hlađenja tečnim helijumom na temperature u blizini apsolutne nule.

Na kraju nekoliko reči o Teslinoj ideji masovnog bežičnog prenosa električne energije. Mada je verovao u tu mogućnost, šta više želeo da ostvari nešto slično kao u bežičnim telekomunikacijama, ipak se uvek ogradjivao sa "možda". Uostalom, on je na visokim učestanostima svojim čuvenim eksperimentom sa sijalicom i demonstrirao jednu od mogućnosti bežičnog prenosa električne energije "na malo". Teško je reći da nije bio svestan bitne razlike u pogledu zahteva koji se postavljaju u vezi dozvoljenog slabljenja pri bežičnom prenosu snage u oba slučaja (telekomunikacije i energetika). U pogledu ideje nije bio sasvim jasan. Zamislio je, po svemu sudeći, dva pravca istraživanja. Jedan sa visokim učestanostima pomoću svog transformatora, za koji je verovao da će biti dovoljan ako ostvari napone reda 100 miliona volti i struje reda 10 kiloampera. Nadao se valjda, da će s obzirom na razredjenost gornjih slojeva atmosfere biti ustanju, možda poput грома i više od njega, da dopre do dobro provodnog jonizovanog sloja atmosfere kao druge elektrode, eventualno da pobudi i osvetli taj sloj, slično polarnoj svetlosti.

Drugi pravac istraživanja išao je k veoma niskim učestanostima, tražeći sopstvenu učestanost zemlje kao neke vrste rezonatora i koristeći zemlju kao provodnik.

Takve ideje nisu mogle da dobiju podršku i finansijsku pomoć onog doba, one su štaviše po svojoj socijalnoj sadržini i eventualnoj tehničkoj ostvarljivosti pripadale nekom budućem društvu. "Svima prema potrebama", to je parola još neostvarenog komunističkog društva.

Rasipanje energije na sve strane dolazi u obzir kada čovek sa zemlje u borbi s prirodom bude prinudjen na tako nešto, tj. kada se zemlja vremenski približi ledenom dobu. Samo neko buduće intenzivno korišćenje nuklearne energije može, energetski gledano, da obezbedi takve enormne količine energije. Po svemu sudeći ni nuklearna energija, oslobođena kontrolisanom kontinualnom fuzijom lakih elemenata rasprostranjenih u prirodi (vodonik, helijum), ne bi bila dovoljna za duži period vremena u te svrhe. Takva fantastična energija, kakva npr. proističe iz zakona energijskog ekvivalenta mase, može se zamisliti u tzv. anihilacionim procesima, kada neka čestica interaguje sa svojom antičesticom iste mase, a suprotnog naelektrisanja, i kada se celokupna masa obeju čestica pretvara u energiju elektromagnetnog zračenja i neutrina.

Očigledno, na takvim idejama rasipanja energije, koje su socijalno, energetski, tehnički i egzistencijalno vezane za buduća stoleća i milenijume, morao se istopiti i sam jedan Nikola Tesla.

Današnje potencijalne mogućnosti "bežičnog" prenosa većih snaga i energije nisu ni približno konkurentne klasičnim "žičnim" sistemima.

Istina, teorijski je moguć i u slobodnom prostoru prenos električne snage i energije na znatne udaljenosti na hiperfrekvencijama i laserskim učestanostima, snaga reda gigavata pri relativno niskim gubicima uporedivim s onima klasičnog prenosa. To se može postići

tzv. kvazioptičkim talasovodima i usmerenim elektromagnetnim zračenjem u "snopovima" (L.14). Kvazioptički talasovodi predstavljaju u suštini periodičku strukturu u slobodnom prostoru po kojoj se prostire snop elektromagnetnih talasa određenog tipa visoke usmerenosti, sa periodičkom restauracijom raspodele polja u snopu. Relativno visok stepen korisnog dejstva može se postići, ako se prijemnik odnosno kvazioptika za obnavljanje polja nalazi u tzv. Frenelovoj zoni emisije antene, tj. ako je proizvod "radijusa" prijemne i emisije antene odnosno od govarajućih uređaja veći od proizvoda njihovog rastojanja i talasne dužine.

Laserski snop izvanredno velike "čistoće" učestanosti i usmerenosti ostvaruje neuporedivo veće gustine snage unutar snopa i uskog frekventnog opsega od Sunčevih radijacija. Pomoću laserskih učestanosti ublažava se problem difrakcije, u smislu otklona od pravolinijskog prostiranja, u odnosu na područje hiperfrekvencija, a takođe se smanjuju i dimenzije "optike" u odnosu na antenske uređaje sa hiperfrekvencijama ali se ima slabost velikih gubitaka pri prostiranju u lošijim atmosferskim uslovima. Danas se i jedna i druga navedena mogućnost prenosa snaga smatraju perspektivnijim kao kanalisani prenos putem talasovoda (L.14 i 15). No i ovakav kanalisani prenos ne može se smatrati u doglednoj budućnosti konkurentnim klasičnom, pre svega zbog oštarih uslova usmerenosti kao i drugih performansi talasovoda, složene konverzije energije na krajevima, stepena korisnog dejstva generatora hiperfrekvencija odnosno laserskih snopova i slabog uklapanja u postojeće sisteme.

ZAKLJUČAK

Teslin polifazni (trofazni) sistem proizvodnje, prenosa i značajnog dela upotrebe električne energije, koji je omogućio grandiozan razvoj savremenih moćnih i prostranih elektroenergetskih sistema ostaje praktično neprikosnoven u celom ovom stoleću. Izvesna reafirmacija jednosmernog sistema prenosa električne energije u izuzetnim i specifičnim uslovima ostvaruje se u krilu trofaznih sistema i uz njihovu pomoć (naponska transformacija). Od novih tehnika su najperspektivnije one koje se dobro uklapaju u savremene elektroenergetske sisteme.

LITERATURA:

1. Angelini A., L'évolution de la transmission d'énergie électrique et l'environnement, CIGRE, Electra No 37, 1974, str. 19 - 53.
2. Blondel A., L'oeuvre de Tesla vu par un de ses contemporains, Nikola Tesla, Spomenica povodom njegove 80 - godišnjice Beograd, 1936., str. 331 - 336.
3. Cverava G. K., Nikola Tesla, Leningrad, 1974 (na ruskom).
4. Descehamps I., Schwab A. M., Lacoste A., Perspectives d'évolution du transport d'énergie par câbles isolés, str. 35-71. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches - Elektricité de France,, No 2, 1975.
5. Erche M., Stromversorgung von Ballungszentren, Techniken der Zukunft, 1972, str. 99 - 103.
6. Hofmann A., Hochspannungübertragung, heute und morgen, ETZ-A, 1971, str. 663 - 672.
7. Yones B. - New Approaches to the Design and Economics of EHV Transmission Plant
International Series of Monographs in Electrical Engineering,
Vol. 4, Pergamon Press, 1972.
8. Kimbark E. W., Direct Current Transmission, Vol. I, Wiley Interscience, New York, 1971.
9. Pélissier R. - Les réseaux d'énergie électrique, Tome 1, Paris, 1971.
10. Ržonsnickij B., Nikola Tesla, Moskva, 1958 (na ruskom).
11. Ščerbakov V. K., Sverhdaljnije elektropredači peremennogo toka, Itogi nauki i tehniki, Električeskie stancii, Seti i sistemi, Tom 6, Moskva 1972 (na ruskom).

12. Denisenko G., Prenos električne energije pulzirajućom strujom (na ruskom), Lavov, 1971.
13. Rakušev P., Prenos energije naizmjeničnom strujom po otvorenim vodovima na velike udaljenosti, Moskva, 1957.
14. Okress E., Microwave Power Engineering, Vol. 1, New York, 1968.
15. Robieux J., Limitations des perspectives offertes par les lasers pour la transmission d'énergie, Congrès S.F.E., Nice, 1971.
16. Venikov V., Zuev E., Okolotin V., Supraprovodnici u energetici, Moskva, 1972.
17. Brotherton M., Masers and Lasers, New York 1964.

Tabela br. 1 - Porast broja stanovnika, potrošnje svih vidova energije
i proizvodnje električne energije u svetu

CEO SVET	Jedinice	Godina			
		1920	1970	1985	2000
Broj stanovnika	milijarde	1,8	3,62	4,8	6,3
Faktor povećanja u odnosu na 1920 god.	-	-	cca 2	cca 2,7	cca 3,5
Ukupna potrošnja energije	10^9 t ekv.	1,5	6,8	13,8	23
Faktor povećanja u odnosu na 1920 god.	goriva (7000 kcal/kg)	-	cca 4,5	cca 9,2	cca 15,5
Proizvodnja elek.energije	10^9 kwh	125	4.900	14.200	40.000
Faktor povećanja u odnosu na 1920. god.	-	-	cca 39	cca 114	cca 320
Udeo električne energije (iskazana kao primarna energija) u ukupnoj energiji	%	7	25	35	50

TAB. 2

Tabela 2

TEHNIČKO-EKONOMSKO UPOREĐENJE PERSPEKTIVNIH
MOGUĆNOSTI NADZEMNOG I PODZEMNOG PRENOŠA VELIKIH SNAGA
NA KRATKE UDALJENOSTI

	nadzemni vod sa 4 sistema	nadzemni vod sa 2 sistema	nadzemni vod sa 1 sistemom	jednožilni uljni kabl	jednožilni uljni kabl hladn	jednožilni cevni kabl sa gasom	superprovodni trofazni kabl	jedinica	napomena
nominalni napon	380			380	380	380	110	KV	
radni napon	400	720	1050	400	400	400	120	KV	računski napon
maksimalni radni napon	420	765	1100	420	420	420	125	KV	
slika stuba 10m									prečnik provodnika
širina trase	82	74	89					m	razmera za provodnik [dm]
presekatnog provodnika	$\times 265/35 \sim 1080 \text{ Al}$	$\times 685/87 \sim 2740 \text{ Al}$	$\times 644/82 \sim 3864 \text{ Al}$	2000 Cu	8000 Al	20cm obim 200mm ²		mm ²	1) pri gubitku superprovodnosti
ukupni presek svih provodnika	$12 \times 1060 \sim 12720 \text{ Al}$	$6 \times 2740 \sim 16440 \text{ Al}$	$3 \times 3864 \sim 11592 \text{ Al}$	3 $\times 2000 \sim 6000 \text{ Cu}$	3 $\times 8000 \sim 24000 \text{ Al}$			mm ²	
termička granica	4 $\times 1900 \sim 7600$	2 $\times 5800 \sim 11600$	12200	1000 Cu				A	
talasni otpor	246	261	250	50	415	21		Ω	
prirodna snaga	4 $\times 650 \sim 2600$	2 $\times 2000 \sim 4000$	4400	3200	3850	680		MW	P _{nat}
prenosna snaga	4 $\times 1300 \sim 5200$ ²⁾	2 $\times 4000 \sim 8000$ ²⁾	8800 ²⁾	1500	2500	2500		MVA	
struja po fazi	1880	3200	4840	643	3600	12000		A	
specifična snaga „punjenja“	4 $\times 695 \sim 2780$	2 $\times 2120 \sim 4240$	4700	11850	4200	1000		KVA Km	
specifični gubici snage	320/1280 ³⁾	170/680 ⁴⁾	140/560 ⁴⁾	336	276	<136		KW Km	4) pri P _{nat} /pri 2-P _{nat}
specifični investicijski troškovi po km	4,5	5,1	3,96	10,2	25,2	21		10 ⁶ DIN Km	5) orijentaciona vrednost
specif. investicijski troškovi po km	864	636	444	22920	10080	8400		DIN Km	
godišnji troškovi sa gubicima	178,8/277,8 ⁶⁾	100,5/134,4 ⁶⁾	66,9/92 ⁶⁾	2542,2	1134	1011		DIN 10 ⁶ Km	6) pri P _{nat} /pri 2-P _{nat}
troškovi prenetog KWh na 10 Km	0,38/0,6	0,21/0,29	0,14/0,19	5,5	2,4	2,1		KWh/10km	7) za comp./max. 4500 h

Nemanja Ž. Petković, dipl.ing.

Radomir Naumov, dipl.ing.

ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT

"NIKOLA TESLA" Beograd

PRENAPONI PRI KOMUTACIJAMA KRATKIH DEONICA SABIRNICA 380 kV

U referatu su analizirani mereni prenaponi na 380 kV sabirnicama i u niskonaponskim kolima mernih transformatora pri komutacijama rastavljača 380 kV. Za obradu uzoraka izmerenih prenapona u HE "Djerdap" primenjene su matematičko-statističke metode. Procenjeni su uticaji konfiguracije postrojenja na visinu izmerenih prenapona.

OVERVOLTAGES DURING SWITCHING OPERATIONS OF SHORT PARTS OF 380 kV BUSES

In this report the overvoltages measured on 380 kV buses and in the low voltage circuits of measuring transformers during switching operations of 380 kV disconnectors are analysed. Mathematical-statistical methods were used in processing samples of overvoltages measured in the hydro-electric power station "Djerdap". The influences of plant configuration on the height of measured overvoltages are also estimated.

1. UVOD

Bile su dve osnovne konfiguracije postrojenja HE "Djerdap" pri merenju prenapona na 380 kV sabirnicama i u niskonaponskim kolima kada komutiraju rastavljači u dalekovodnom polju Rumunija, a prekidač ovog polja je otvoren. Na sistemu sabirnica I bili su priključeni transformatori T1 i T3 i dalekovod Beograd (SSI:T1+T3+DV Bgd). Na sistemu sabirnica II bili su priključeni transformator T2 i dalekovod Bor (SSII:T2+DV Bor).

Da bi se sa usvojenom pouzdanošću procenila verovatnoća visine izmerenih prenapona i uočio uticaj konfiguracije postrojenja, primenjene su matematičko statističke metode obrade uzorka normalne raspodele. Od najvećih izmerenih prenapona pri jednoj komutaciji formirani su sledeći uzorci:

- a) na mestu komutacije rastavljača 380 kV,
- b) u niskonaponskim kolima naponskih transformatora,
- c) u niskonaponskim kolima strujnih transformatora.

Grafički je prikazana raspodela dva uzorka i njihova aproksimacija normalnom raspodelom s usvojenom pouzdanošću. Analizirani su ovako obradjeni rezultati izmerenih prenapona.

2. MATEMATIČKO STATISTIČKA METODA OBRADJE REZULTATA ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja su obradjeni kao uzorak skupa slučajnih veličina.

Za svaki uzorak su određeni parametri:

Centar raspodele

$$a = \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} U_k, \quad 1$$

i disperzija

$$\sigma^2 \approx s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{k=n} (U_k - \bar{U})^2, \quad 2$$

gde su: n - broj članova uzorka

U_k - prenapon ubrojan po veličini.

Primenom χ^2 - kriterijuma testirana je pripadnost funkcije raspodele uzorka

$$F(U_k) = \frac{k - 0,5}{n}, \quad 3$$

funkciji normalne raspodele

$$\phi(U_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_k} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad 4$$

gde je,

$$x_k = \frac{U_k - \bar{U}}{s} \quad 5$$

Za procenu centra raspodele (α) i standardnog odstupanja (σ) primenjeni su Studentov i χ^2 -kriterijum.

Na osnovu kriterijuma studenta:

$$\alpha_\alpha = \bar{U} - t(p, k) \frac{s}{\sqrt{n}} < \alpha < \bar{U} + t(p, k) \frac{s}{\sqrt{n}} = \alpha_g, \quad 6$$

sa verovatnoćom:

$$P\left(\left|\frac{\bar{U} - \alpha}{s/\sqrt{n}}\right| < t_1\right) = 2 \int_0^{t_1} p_t(t) dt = P, \quad 7$$

odnosno sa pouzdanošću - $P_a(t, k)$.

Na osnovu χ^2 -kriterijuma:

$$\sigma_\alpha = s \sqrt{\frac{n-1}{w_2}} < \sigma < s \sqrt{\frac{n-1}{w_1}} = \sigma_g, \quad 8$$

sa pouzdanošću:

$$P_\sigma(w_1 < w < w_2) = 1 - \int_0^{w_1} p_{\chi^2}(w) dw - \int_{w_2}^{\infty} p_{\chi^2}(w) dw. \quad 9$$

Usvojenom prihvatljivom pouzdanosti:

$$P_\alpha(t, k) = P_\sigma(w_1, w_2, k) = P, \quad 10$$

može se aproksimirati funkcija raspodele uzorka, funkcijom normalne raspodele,

$$\psi(x_\alpha, P) < F(U_k) < \psi(x_g, P). \quad 11$$

Tada su:

$$\psi(x_g, P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_g} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad 12$$

i za : $a_g < U < \infty$,

$$x_g = \frac{U - a_d}{\sigma_d} \quad i$$

$$x_d = \frac{U - a_g}{\sigma_g} .$$

U grafički prikazanim (Gausova razmera) primerima, obradjenih rezultata merenja prenapona, naznačeni su:

$F(U)$ - eksperimentalna funkcija raspodele,

$\phi(U)$ - teorijska funkcija normalne raspodele i

$\psi(U)$ - teorijska funkcija normalne raspodele koja sa pouzdanošću $P = 0,99$ aproksimira eksperimentalnu funkciju raspodele.

3. OBRADA REZULTATA IZMERENIH PRENAPONA

Prenaponi su snimani blizu mesta komutacija, na priključcima prekidača 380 kV dalekovoda Rumunija, kada u tom polju komutiraju sabirnički rastavljači. U niskonaponskim kolima mernih transformatora, snimani su prenaponi u polju dalekovoda Beograd (SSI:T1+T3+DV Bgd.) i u polju dalekovoda Bor (SSII:T2 + DV Bor).

Poremećaj tokova elektromagnetne energije pri komutaciji rastavljača sa kratkim deonicama sabirnica, uslovljava prenaponske impulse koji odgovaraju atmosferskim prenaponima. Vremenske i prostorne karakteristike izmerenih prenaponskih impulsa su: na mestu komutacije oko 0,3/10,us (90/3000 m) i u sekundarnim kolima oko 0,5/15,us (150/4500 m).

Prenaponski impulsi se pojavljuju nekoliko puta u jednoj poluperiodi (50 Hz). Učestalost prenaponskih impulsa je: najveća u početku procesa pri isključenju, i na kraju procesa pri uključenju. Amplitude prenaponskih impulsa su najveće u

početku procesa pri uključenju i na kraju procesa pri isključenju. Očitavana je najveća amplituda pri jednoj operaciji rastavljača.

Od po jedne maksimalne izmerene vrednosti amplitude prenaponskog impulsa, po jednoj fazi i po jednoj operaciji rastavljača, formirani su uzorci prenapona. Oni su obradjeni izloženom matematičko-statističkim metodama.

Maksimalne izmerene amplitude prenaponskih impulsa na sabirnicama 380 kV obradjene su u dva uzorka:

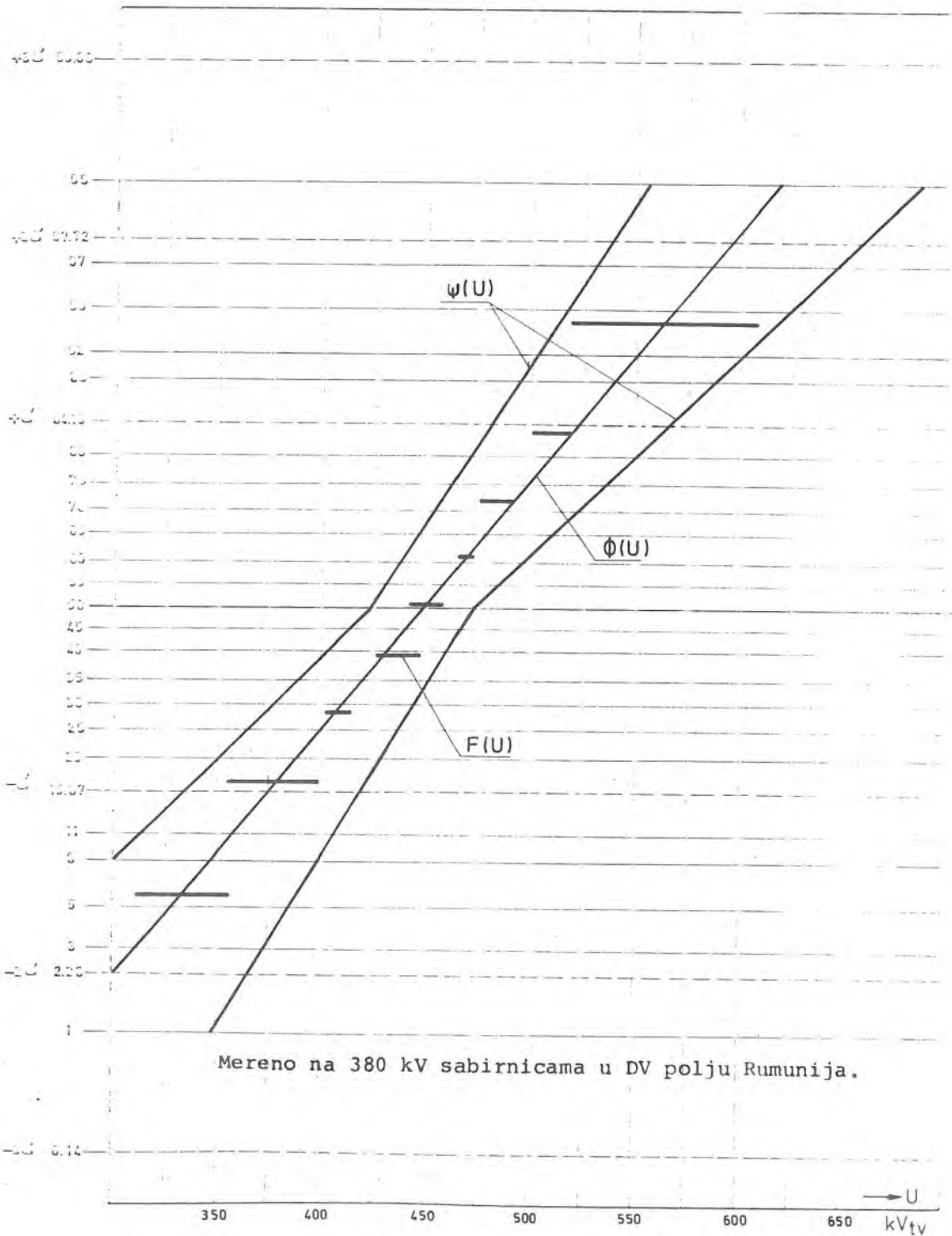
- Prenaponi pri isključenju sabirničkog rastavljača u DV polju Rumunija, i
- Prenaponi pri uključenju sabirničkog rastavljača u DV polju Rumunija.

Maksimalne izmerene amplitude prenetih prenaponskih impulsa u niskonaponskim kolima mernih transformatora, obradjene su u četiri uzorka:

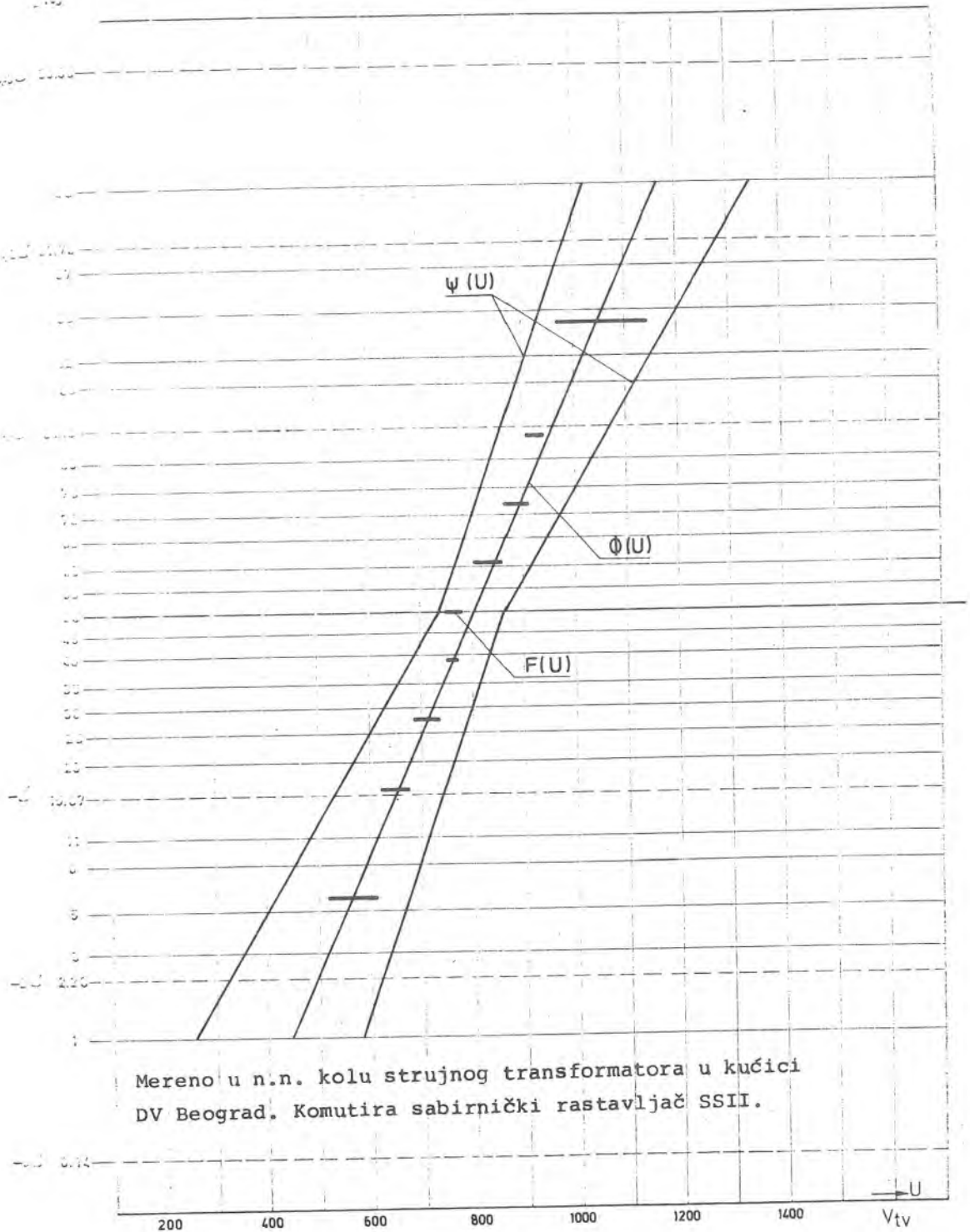
- Preneti prenaponi u niskonaponskim kolima naponskih transformatora (NTII) u polju DV Bor (SSII: T2+DV Bor), pri komutaciji sabirničkog rastavljača SSII u polju DV Rumunija.
- Preneti prenaponi u niskonaponskim kolima naponskih transformatora (NTI) u polju DV Beograd (SSI: T1+T3+DV Bgd.), pri komutaciji sabirničkog rastavljača SSI u polju DV Rumunija.
- Preneti prenaponi u niskonaponskim kolima strujnih transformatora (STII) u polju DV Bor (SSII: T2+DV Bor), pri komutaciji sabirničkog rastavljača SSII u polju DV Rumunija, i
- Preneti prenaponi u niskonaponskim kolima strujnih transformatora (STI) u polju DV Beograd (SSI: T1+T3+DV Beograd), pri komutaciji sabirničkog rastavljača SSI u polju DV Rumunija.

Tabela T1.

Parametri uzoraka	Merenje na pri- ključku 380 kV prekidača		Merenje u n.n. kolu naponskih transformatora		Merenje u n.n. kolu strujnih transformatora	
	Komutacija rastavljača		Komutacije i merenja u:		Komutacije i merenja u:	
	isklju- čenje	uklju- čenje	SSII	SSI	SSII	SSI
	kV _{tv}	kV _{tv}	kV _{tv}	kV _{tv}	kV _{tv}	kV _{tv}
	I	U	NTII	NTI	STII	STI
$\bar{U}$	450	413	988	346	797	320
σ	75	52	233	80	155	69
n (broj članova)	64	59	20	34	46	41
$U/\psi > 50\%, P = 0,99$	475	430	1140	385	860	360
$U/\psi > 99\%, P = 0,99$	690	580	1910	640	1350	580



ISKLUČENJA $n = 64$; $\bar{U} = 450 \text{ kV}_{tv}$; $\sigma = 75 \text{ kV}_{tv}$ $P = 0.99$



ST DV Bor (SSII : T2 + DV Bor)
n=46 , $\bar{U}=797 V_{tv}$, $\bar{G}=155 V_{tv}$, P=0.99

Sl. 2.

U tabeli T1 dati su parametri formiranih uzoraka: $\bar{U}$, σ i n . Za svaki uzorak su procenjeni sa pouzdanošću $P=0,99$ najviši prenaponi:

- $U(50 \%, P = 0,99)$ - za 50 % verovatnoću, i
- $U(99 \%, P = 0,99)$ - za 99 % verovatnoću.

Na sl. 1 i sl. 2 u Gausovoj razmeri prikazane su funkcije raspodele dva karakteristična uzorka.

4. ANALIZA OBRADJENIH REZULTATA MERENJA

Obradjeni rezultati izmerenih najviših prenapona u sebi sadrže informaciju o osobinama opreme postrojenja. Poređenje visine prenapona pri jednakim verovatnoćama, 50 % ili 99 %, procenjene sa pouzdanošću $P = 0,99$, potvrđuju se određene zakonitosti nastajanja prenapona na 380 kV sabirnicama i u niskonaponskim kolima.

Odnosi najvećih vrednosti izmerenih prenapona na 380 kV sabirnicama pri isključenju i pri uključenju rastavljača su:

$$U(Isk)/U(Uklj) = 475/430 = 1,1$$

za 50 %-nu verovatnoću, i

$$U(Isk)/U(Uklj) = 690/580 = 1,19$$

za 99 %-nu verovatnoću. To opravdava posmatranje prenetih prenapona u n.n. kolima kao posledicu objedinjene komutacije rastavljača (i uključenje, i isključenje).

U n.n. kolu naponskih transformatora odnosi najvećih izmerenih vrednosti u SSII i SSI su:

$$U(NTII)/U(NTI) = 1140/385 = 2,95$$

za 50 %-nu verovatnoću i

$$U(NTII)/U(NTI) = 1910/640 = 2,99$$

Za 99 %-nu verovatnoću. To potvrđuje da su preneti prenapon u n.n. kolu SSII, do 3 puta, veći od prenetih prenapona u n.n. kolu SSI.

U n.n. kolima strujnih transformatora odnosi najvećih izmerenih vrednosti u SSII i SSI su:

$$U(STII)/U(STI) = 860/360 = 2,4$$

za 50%-nu verovatnoću, i

$$U(STII)/U(STI) = 1350/580 = 2,3$$

za 99 %-nu verovatnoću. To potvrđuje da su prenaponi u n.n. kolu strujnih transformatora SSII, do 2,5 puta veći od prenetih prenapona u n.n. kolu strujnih transformatora SSI.

Ova poredjenja rezultata naglašavaju uticaj konfiguracije SSII i SSI na visinu prenapona izmerenih u niskonaponskim kolima.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize obradjenih izmerenih najviših prenapona na 380 kV sabirnicama i u sekundarnim kolima mernih transformatora, mogu se formulisati sledeći zaključci:

- Da je visina prenapona pri uključenju rastavljača praktično jednaka sa visinom prenapona pri isključenju rastavljača.
- Da razgranatija konfiguracija visokonaponskog kola sistem sabirnica I(SSI:T1+T3+DV Beograd), većim grananjem elektromagnetne energije, u manjoj meri prenosi prenapone u niskonaponska kola.
- Da manje razgranata konfiguracija visokonaponskog kola, sistem sabirnica II(SSII:T2+T2+DV Bor), manjim grananjem elektromagnetne energije, u većoj meri prenosi prenapone u niskonaponska kola.

- Da ujednačen nivo prenetih prenapona u niskona-
ponskim kolima strujnih i naponskih transforma-
tora, u istom DV polju, odgovara medjusobno ujed-
načenim impedansama talasne prirode u mikrose-
kundnom trajanju.

OSNOVNA LITERATURA

1. K.S.Stjefanov: Tjehnika visokih naprjaženij (Lenjingrad 1967.),
2. J.Jirku-F.Popolansky: Atmosfericka prepeti elektricke energie
(Praha 1966.).
3. L.Z.Rumšiskij: Eljementi teoriji vjerojatnostje (Moskva
1970).
4. S.Uiliks: Matjematičeskaja statiscika (Moskva 1967.).
5. Janke-Emde-Lösch: Specijaljnje funkcii (Moskva 1968).
6. B.Ivanović: Teorijska statistika (Beograd 1973.).
7. Izveštaj Instituta "Nikola Tesla" broj 376118.

Milan Stojšavljević
"Rade Končar" Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

UTJECAJ REGULACIJE UZBUDE SINHRONIH GENERATORA NA PARALELNI RAD ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

Paralelni rad elektroenergetskih sistema često puta može biti onemogućen, ili vezan za mnogo pogonskih problema zbog pojave neprigušenih ili slabo prigušenih elektromehaničkih njihanja. Jedan od načina rješavanja ovog problema svodi se na prigušenje elektromehaničkih njihanja pojedinog agregata djelovanjem preko sistema uzbude sinhronog generatora i opisuje se u referatu.

Posebno je prikazan utjecaj dodatnog regulacionog signala, uvedenog u regulatore uzbude sinhronih generatora HE "Djerdap", na pojavu elektromehaničkih njihanja u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije pri paralelnom radu s elektroenergetskim sistemom UCPTE.

EFFECT OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION CONTROL ON THE PARALLEL OPERATION OF POWER SYSTEMS

The parallel operation of power systems can frequently be hindered or associated with many operating problems, due to the occurrence of undamped or poorly damped electromechanical oscillations. One of the ways to resolve this problem involves damping the electromechanical oscillations of individual generating sets through the excitation system of synchronous generators.

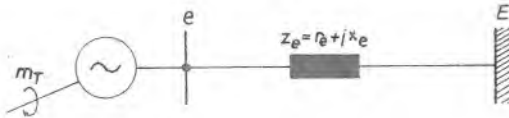
The influence of the additional regulating signal introduced in the excitation system of synchronous generators of the "Djerdap" hydroelectric power station on the appearance of electromechanical oscillations in the electric power system of Yugoslavia during parallel operation with the UCPTE electric power system is reviewed extensively.

1. Uvod

U toku paralelnog rada dvaju ili više elektroenergetskih sistema može, u određenim vremenskim periodima, doći do narušavanja dinamičke stabilnosti jednog, dva, a u krajnjem slučaju i svih elektroenergetskih sistema u paralelnom radu. Narušavanje dinamičke stabilnosti očituje se u pojavi neprigušenih ili slabo prigušenih spontanih elektromehaničkih njihanja ili njihanja izazvanih raznim smetnjama. Uvjeti, pod kojima se javljaju njihanja, su složena funkcija parametara spojnih vodova, trenutne konfiguracije elektroenergetskih sistema, broja i vrste proizvodnih jedinica i njihove trenutne angažiranosti, vrste i lokacije potrošača itd. Elektromehanička njihanja očituju se u njihanju karakterističnih veličina stanja agregata, proizvodnih jedinica, prenosnih linija, odnosno veličina stanja cijelog elektroenergetskog sistema (npr. brzine vrtnje, frekvencije, aktivne i reaktivne snage). Efikasan način da se spriječe i priguše spontana njihanja kao i njihanja izazvana smetnjama, je izmjena vlastitih karakteristika sistema. Analize i iskustvo na rješavanju tog problema pokazuju da se najjednostavnije, a istovremeno i najefikasnije, mogu poboljšati svojstva sinhronog generatora. To se postiže uvođenjem dodatnih regulacionih signala (frekvencije, brzine vrtnje, aktivne snage, kuta opterećenja generatora itd.) preko tzv. stabilizatora elektroenergetskog sistema u regulatore uzbude sinhronih generatora. Uvođenjem dodatnog regulacionog signala u regulator uzbude proizvodi se u toku prelaznog procesa dodatni elektromagnetski moment (uglavnom prigušna komponenta elektromagnetskog momenta) koji poboljšava svojstva sinhronog generatora u smislu prigušenja njihanja, odnosno povećava rezervu dinamičke stabilnosti kako samog agregata tako i elektrane i cijelog elektroenergetskog sistema. Jedna od metoda za studij ovog problema je istraživanje na jednomašinskom sistemu (sinhroni generator priključen na krutu mrežu preko vanjske impedancije) i verifikacija dobivenih rezultata u toku paralelnog rada elektroenergetskih sistema.

Važna činjenica je da ta el. meh. njihanja nemaju u početku karakter nelinearne pojave, što znači da se u studiranju ovog problema mogu koristiti linearizirani matematički modeli i metode za analizu linearnih sistema.

2. Matematički model jednomašinskog sistema



Sl. 1 Jednopolna shema izučavanog sistema

Matematički model jednomašinskog sistema (sl. 1) uz zanemarenje radnih otpora statora sinhronog generatora, napona transformacije, djelovanja prigušnog kaveza i zasićenja definira slijedeći sistem jednažbi:

$$e^2 = e_d^2 + e_q^2 \quad \dots (1)$$

$$-e_d = -i_q x_q \quad \dots (2)$$

$$e_q = E_q' - i_d x_d' \quad \dots (3)$$

$$E_q = E_q' + (x_q - x_d') i_d \quad \dots (4)$$

$$m_e = i_q E_q \quad \dots (5)$$

$$i_d = \frac{(E_q - E \cos \delta)(x_e + x_q) - r_e E \sin \delta}{r_e^2 + (x_e + x_q)^2} \quad \dots (6)$$

$$i_q = \frac{(E_q - E \cos \delta) r_e + (x_e + x_q) E \sin \delta}{r_e^2 + (x_e + x_q)^2} \quad \dots (7)$$

$$E_q' = x_{ad} I_{fd} - (x_d - x_d') i_d \quad \dots (8)$$

$$T_{do}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{fd} - x_{ad} I_{fd} \quad \dots (9)$$

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = m_T - m_e \quad \dots (10)$$

Linearizirani matematički model uz pretpostavku konstantnog momenta turbine ($\Delta m_T = 0$) glasi:

$$\Delta e = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q' \quad \dots (11)$$

$$\Delta E_q' = \frac{K_3}{1 + p T_{do}' K_3} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{1 + p T_{do}' K_3} \Delta \delta \quad \dots (12)$$

$$\Delta m_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q' \quad \dots (13)$$

$$\Delta \omega = - \frac{\Delta m_e}{p M} \quad \dots (14)$$

$$\Delta \delta = \frac{100 \pi}{p} \Delta \omega \quad \dots (15)$$

Za potpuni linearizirani matematički model sistemu jednažbi (11) do (15) treba pridružiti jednažbu sistema uzbude i stabilizatora elektroenergetskog sistema, a u jednažbu (13) uključiti vlastito prigušenje generatora (D), koje je posljedica prigušnog djelovanja uzbudnog namota, prigušnog namota i efekta ispunjenosti rotora.

U skladu s tim jednažba (13) glasi:

$$\Delta m_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + D \Delta \omega.$$

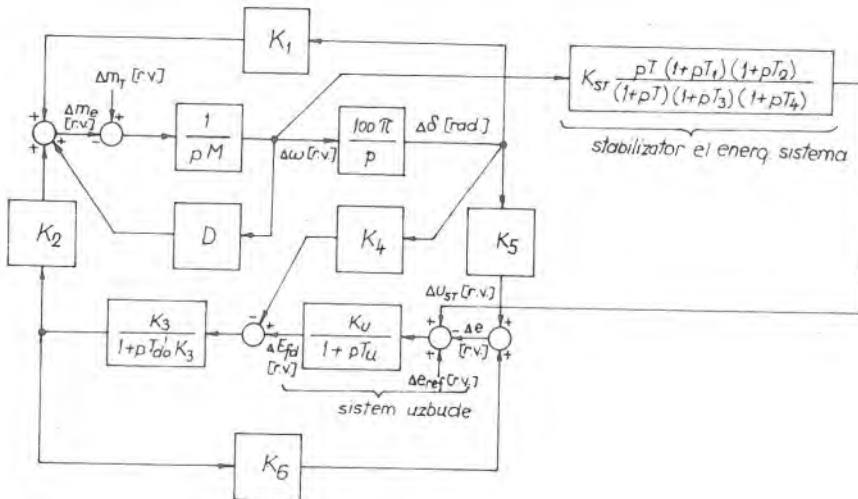
Pretpostavimo li uzbudni sistem s poluvodičkim regulatorom uzbude i tiristorskim usmjerivačem kao uzbudnikom, možemo napisati jedn. uzbudnog sistema:

$$\Delta E_{fd} = \frac{K_u}{1 + pT_u} (-\Delta e + \Delta U_{ST}). \quad \dots (16)$$

Uz dodatni regulacioni signal po frekvenciji ($\Delta \omega$) jednažba stabilizatora elektroenergetskog sistema glasi:

$$\Delta U_{ST} = F_{ST}(p) \Delta \omega = K_{ST} \frac{pT (1+pT_1)(1+pT_2)}{(1+pT)(1+pT_3)(1+pT_4)}. \quad \dots (17)$$

Linearizirani matematički model opisuje blok shemu (sl. 2) sinhronog generatora, priključenog na krutu mrežu preko vanjske impedancije, prikladnu za analizu teorijom malih pomaka.



Sl. 2 Blok shema jednomašinskog sistema

3. Elektromagnetski moment

Zadatak stabilizatora elektroenergetskog sistema je taj da u toku prelaznog procesa djelovanjem preko sistema uzbude sinhronog generatora proizvede dodatni prigušni el.magn. moment. Taj zadatak proizlazi iz detaljne analize el.magn. momenta za uobičajeni opseg frekvencija elektromehaničkih njihanja (0.1 Hz - 2 Hz) uz uvažavanje utjecaja konstanti stanja $K_1 \dots K_6$ (11) i moguće načine regulacije uzbude.

Promjena elektromagnetskog momenta istraživana je preko promjene njegovih komponenti (sinhronizacione i prigušne), odnosno preko koeficijenata sinhronizacionog i prigušnog el.magn. momenta. Sinhronizaciona komponenta (Δm_{es}) je u fazi s promjenom kuta opterećenja ($\Delta \delta$), a prigušna (Δm_{ed}) u fazi s promjenom kutne brzine ($\Delta \omega$). Pod koeficijentom sinhronizacionog (K_s) i prigušnog (K_d) el.magn. momenta podrazumijevamo izraz koji množi promjenu kuta opterećenja ($\Delta \delta$), odnosno promjenu kutne brzine ($\Delta \omega$). Kod ovih istraživanja korišten je linearizirani matematički model, iz kojeg je izostavljeno vlastito prigušenje sinhronog generatora (D), koje je uvijek pozitivno.

Rezultati istraživanja za tri specifična stanja sistema uzbude opisani su u daljnjem tekstu.

3.1. Sinhroni generator bez regulatora uzbude - ručna regulacija

$$K_s = K_1 - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + \omega^2 T_{d0}^2 K_3^2} \quad (18)$$

$$K_d = \frac{100\pi K_2 K_3^2 K_4 T_{d0}}{1 + \omega^2 T_{d0}^2 K_3^2} \quad (19)$$

Iznosi koeficijenata sinhronizacionog K_s i prigušnog K_d el.magn.momenta uz konstantan napon uzbude $\Delta E_{fd} = 0$ (ručna regulacija) definirani relacijama (18) i (19) su funkcija parametara prenosne linije i agregata, stacionarnog stanja u promatranom trenutku i frekvencije el.meh.njihanja; i za sve slučajeve jednomašinskih sistema koje susrećemo u praksi su pozitivni.

3.2. Sinhroni generator s tiristorskim sistemom uzbude

Za ovaj slučaj stanja sistema uzbude potpuni izrazi za koeficijente sinhroniza-

cionog i prigušnog el. magn. momenta glase:

$$K_S = K_1 - \frac{K_2 K_5 K_u \left(\frac{1}{K_3} + K_6 K_u - \omega^2 T_{d0}' T_u \right) + K_2 K_4 \left(\frac{1}{K_3} + K_6 K_u + \omega^2 \frac{T_u^2}{K_3} \right)}{\left(\frac{1}{K_3} + K_6 K_u - \omega^2 T_{d0}' T_u \right)^2 + \omega^2 \left(T_{d0}' + \frac{T_u}{K_3} \right)^2} \quad (20)$$

$$K_D = -100\pi \frac{-K_2 K_5 K_u \left(T_{d0}' + \frac{T_u}{K_3} \right) + K_2 K_4 \left[T_u \left(\frac{1}{K_3} + K_6 K_u - \omega^2 T_{d0}' T_u \right) - T_{d0}' \right]}{\left(\frac{1}{K_3} + K_6 K_u - \omega^2 T_{d0}' T_u \right)^2 + \omega^2 \left(T_{d0}' + \frac{T_u}{K_3} \right)^2} \quad (21)$$

Ovi izrazi se znatno pojednostavljaju ako se zanemari promjena el. magn. momenta izazvana promjenom kuta opterećenja $\Delta \delta$ preko K_4 (sl. 2).

To je moguće, jer uz dovoljno visoko pojačanje sistema uzbude K_u doprinos u promjeni el. magn. momenta od promjene kuta opterećenja $\Delta \delta$ preko K_4 postaje beznačajan. Daljnja pojednostavljenja moguća su, ako se promatranja vrše za niske ($\omega < 1$) i visoke ($\omega > 10$) frekvencije el. meh. njihanja.

Rezultati istraživanja pokazuju da, u najčešće susretanim slučajevima nestabilne konfiguracije kada je $K_5 < 0$, uključenje ispravno podešene proporcionalne regulacije uzbude uzrokuje povećanje koeficijenta sinhronizacionog momenta uz istovremeno smanjivanje ukupnog koeficijenta prigušnog momenta. Dovoljno visoko pojačanje sistema uzbude K_u može prouzročiti smanjenje koeficijenta prigušnog momenta na beznačajan iznos, a u krajnjem slučaju ukupni koeficijent prigušnog momenta, a prema tome i prigušni moment može postati negativan. U oba slučaja posljedica je narušavanje dinamičke stabilnosti.

Ovaj problem dinamičke stabilnosti jednomašinskog sistema, kao i cijelog el. energ. sistema, možemo efikasno riješiti ako osiguramo dodatni prigušni el. magn. moment uvođenjem dodatnog regulacionog signala u regulator uzbude sinhronog generatora.

3.3. Sinhroni generator s tiristorskim sistemom uzbude i dodatnim regulacionim signalom po frekvenciji

U ovom slučaju treba poći od izraza (22) za promjenu elektromagnetskog momenta izazvanu dodatnim signalom (Δu_{ST}).

$$\frac{\Delta M_e}{\Delta u_{ST}} = \frac{K_2 K_3 K_u}{(1 + p T_{d0}' K_3)(1 + p T_u) + K_3 K_6 K_u - \frac{100\pi K_2 K_3 (K_5 K_u + K_4(1 + p T_u))}{100\pi K_1 + p^2 M}} = F(p) \quad (22)$$

Δu_{ST} je izlazni signal stabilizatora el.energ. sistema koji koristi odstupanje frekvencije kao dodatni regulacioni signal. Da bi se u interesantnom spektru frekvencija el.meh.njihanja 0.1 Hz do 2Hz ovim signalom proizveo isključivo dodatni prigušni el.magn. moment, potrebno je da prenosna funkcija stabilizatora el.energ. sistema (rel. (17)) bude takva da se kompenzira fazno kašnjenje definirano relacijom (22). Ovaj uvjet proizlazi iz činjenice da je prigušni el.magn. moment u fazi s promjenom kutne brzine (frekvencije). Kako ni za ovako uski interval frekvencija njihanja nije moguće postići idealnu kompenzaciju faznog kašnjenja, to ćemo u toku prelaznog procesa imati pored dodatnog prigušnog i dodatni sinhronizacioni moment. Općenito, promjenu el.magn. momenta, ostvarenu preko dodatnog regulacionog kruga, opisuje relacija (23).

$$\Delta m_e = F(p) F_{ST}(p) \Delta \omega \quad \dots (23)$$

Označimo li sa α kut kašnjenja definiran relacijom (22) za proizvoljnu frekvenciju njihanja ω , sa β kut prethodjenja prenosne funkcije $F_{ST}(p)$ kod iste frekvencije i sa K_{Dd} dinamičko pojačanje dodatnog regulacionog kruga pri toj frekvenciji, tada su koeficijenti dodatnog sinhronizacionog i prigušnog el. magn. momenta definirani slijedećim izrazima:

$$K_s = \frac{K_{Dd}}{100\pi \omega} \sin(\alpha - \beta) \quad \dots (24)$$

$$K_q = K_{Dd} \cos(\beta - \alpha). \quad \dots (25)$$

Preporučljivo je, posebno kod nižih frekvencija njihanja, zadržati kut β nešto manjim od kuta α , jer će u tom slučaju i dodatni sinhronizacioni moment biti pozitivan.

4. Prikaz odnosa na konkretnom primjeru

4.1. Podaci jednomašinskog sistema uz $S_b = 190$ MVA i $U_b = 15.75$ kV

a) Generator

S	$= 1$	x	$= 0.93$
U^n	$= 1$	T_d^d	$= 7.4$ s
$\cos \varphi_n$	$= 0.9$	M^d	$= 6.64$ Ws /VA
I	$= 1$	K	$= 50$
x_d^n	$= 1.246$	T_u^u	$= 0.04$ s
x_d^d	$= 0.382$		

- b) Vanjska impedancija $x_e = 0.2$
 $r_e = 0.0075$

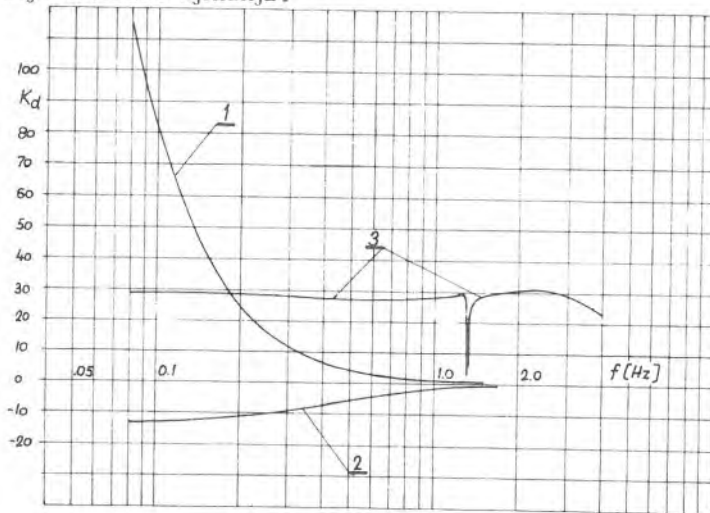
- c) Stacionarno stanje - nazivni režim rada generatora

$$\begin{array}{ll} K_1 = 1.440496 & K_4 = 0.906795 \\ K_2 = 1.086883 & K_5 = -0.049654 \\ K_3 = 0.402510 & K_6 = 0.300721 \end{array}$$

- d) Frekvencija vlastitih njihanja $f_n = 1.314 \text{ Hz}$.

Koeficijent vlastitog prigušenja generatora D za frekvencije njihanja u okolišu vlastite frekvencije procijenjen je na vrijednost 10.

Na sl. 3 prikazani su koeficijenti prigušnog el.magn. momenta bez vlastitog prigušenja generatora za diskutirane slučajeve regulacije uzbude kao funkcije frekvencije el.meh. njihanja.



Sl. 3 Koeficijenti prigušne komponente el. magn. momenta

1 - ručna regulacija, 2 - s automatskim regulatorom uzbude i 3- od stabilizatora el. energ. sistema uz $T = 20 \text{ s}$, $T_1 = 0.3 \text{ s}$, $T_2 = 0.1 \text{ s}$, $T_3 = T_4 = 0.01 \text{ s}$ i $K_{ST} = 10$ r.v. napona reference / r.v. frekvencije.

Koeficijent uvijek pozitivnog prigušnog momenta u slučaju ručne regulacije (krivulja 1) za odabrani režim rada oštro se smanjuje idući od nižih ka višim frekvencijama njihanja i kod vlastite frekvencije njihanja agregata je zanemarljivog iznosa.

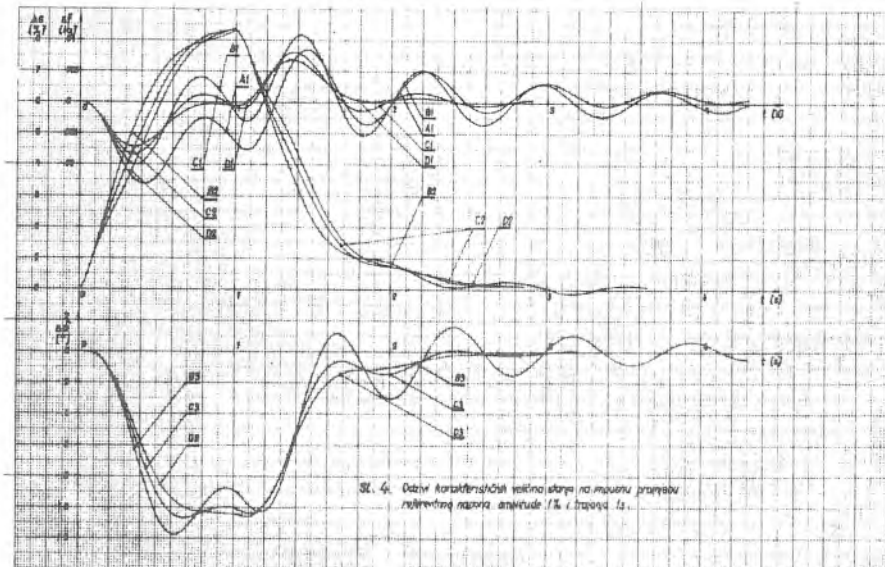
Kod automatske regulacije uzbude koeficijent prigušnog momenta za razmatrani

slučaj ima dosta visoku negativnu vrijednost na početku interesantnog intervala frekvencija el.meh.njihanja ($0.1 \text{ Hz} - 2 \text{ Hz}$), a zatim se smanjuje po apsolutnom iznosu i kod frekvencije f_n također je zanemarivog iznosa, ali još uvijek negativan. Očito je da je automatska regulacija uzbude posebno nepovoljna kod nižih frekvencija njihanja, kakve su upravo frekvencije njihanja el.energ. sistema.

Za vlastitu frekvenciju njihanja agregata prigušni el. magn. moment uglavnom je određen vlastitim prigušenjem generatora.

Dodatni koeficijent prigušnog momenta od stabilizatora el.energ. sistema je pozitivan i gotovo konstantnog iznosa u interesantnom spektru frekvencija njihanja s prekidnom točkom na vlastitoj frekvenciji njihanja agregata.

Na sl. 4 prikazani su odzivi karakterističnih veličina stanja jednomašinskog sistema na impulsnu promjenu referentnog napona.



Sl. 4. Odzivi karakterističnih veličina stanja na impulsnu promjenu referentnog napona, amplituda 1% i brzina 1s.

Legenda uz sl. 4

Slučaj A - ručna regulacija

$$A1 \dots \Delta f = \Delta f(t)$$

Slučaj B - automatska regulacija uzbude

$$B1 \dots \Delta f = \Delta f(t)$$

$$B2 \dots \Delta e = \Delta e(t)$$

$$B3 \dots \Delta \delta = \Delta \delta(t)$$

Slučaj C i D - automatska regulacija uzbude sa dodatnim regulacionim signalom po frekvenciji

$$\text{uz } K_{ST} = 5$$

$$C1 \dots \Delta f = \Delta f(t)$$

$$C2 \dots \Delta e = \Delta e(t)$$

$$C3 \dots \Delta \delta = \Delta \delta(t)$$

$$\text{uz } K_{ST} = 10$$

$$D1 \dots \Delta f = \Delta f(t)$$

$$D2 \dots \Delta e = \Delta e(t)$$

$$D3 \dots \Delta \delta = \Delta \delta(t)$$

Analiza vremenskih promjena odstupanja frekvencije A1, B1, C1, D1 (sl.4) pokazuje:

1. vremenske promjene odstupanja frekvencije za slučajeve A i B su gotovo istog karaktera samo su amplitude njihanja u slučaju A nešto niže od onih u slučaju B. Ovakvi rezultati su i očekivani, jer pozitivni dodatni koeficijent prigušnog momenta u slučaju A i negativni u slučaju B neznatno povećava, odnosno smanjuje koeficijent vlastitog prigušnog momenta generatora D (vidi sl. 3).
2. uvođenjem dodatnog regulacionog signala po frekvenciji dobiva se jako prigušno djelovanje.
3. prikaz utjecaja dodatnih regulacionih signala u HE "Djerdap" na pojavu el.meh. njihanja u el.energ.sistemu Jugoslavije u toku prelaznog procesa nakon povezivanja s elektroenergetskim sistemom Italije

U toku pokusa paralelnog rada el.energ. sistema Jugoslavije s el.energ. sistemom Italije i Austrije (SUDEL - prsten), koji su dio evropskog el.energ. sistema (UCPTE), pojavljivala su se u određenim režimima rada znatna njihanja aktivne snage na spojnou vodu i lokalna njihanja snage i frekvencije el. energ. sistema Jugoslavije. Ova njihanja su bila s malim ili negativnim

prigušenjem. Njihanja s negativnim prigušenjem redovito su dovodila do prekida paralelnog rada. Period njihanja iznosio je 4.5 do 5.6 s, a amplituda njihanja frekvencije rasla je idući od spojne točke k istočnoj strani našeg elektroenergetskog sistema, dok je amplituda njihanja aktivne snage rasla idući u suprotnom smjeru. Iz analize osnovne konfiguracije našeg el. energ. sistema i rezultata probnih paralelnih radova potekla je ideja da bi se uvođenjem dodatnih regulacionih signala u regulatore uzbude HE "Djerdap" mogla eliminirati njihanja te proizvodne jedinice, i na taj način utjecati na karakter njihanja u el. energ. sistemu. HE "Djerdap" je izabrana zbog toga što ona s obzirom na svoj energetska kapacitet i geografski položaj predstavlja značajnu proizvodnu jedinicu našeg el. energ. sistema i što su njeni generatori opremljeni tiristorskim sistemom uzbude s višeparametarskim regulatorima uzbude, koji imaju i dodatni regulacioni krug po frekvenciji. On je na svim generatorima bio podešen isključivo za prigušenje njihanja agregata. Da bi se moglo efikasno utjecati i na sistemska njihanja, izvršeno je prepodešavanje parametara dodatnih regulacionih krugova po frekvenciji, kako na generatorima proizvedenim u SSSR-u tako i na generatorima proizvodnje "Rade Končar".

5.1 Konfiguracija el. energ. sistema Jugoslavije i stanje proizvodnih jedinica

Osnovna konfiguracija el. energ. sistema Jugoslavije u periodu od 17. do 19.4. 1974. kada su vršeni pokusi povezivanja dvaju el. energ. sistema, odgovarala je konfiguraciji prikazanoj na sl. 5. Svi 380 kV, 220 kV i 110 kV dalekovodi bili su u normalnom pogonu osim njih nekoliko, koji su na sl. 5. posebno označeni.

Stanje proizvodnih jedinica bilo je slijedeće: oko 45% maksimalno raspoložive snage u termoelektranama bilo je u vrijeme vršenja pokusa povezivanja van pogona, dok je u gotovo svim hidroelektranama vršena znatna redukcija proizvodnje u noćnom periodu.

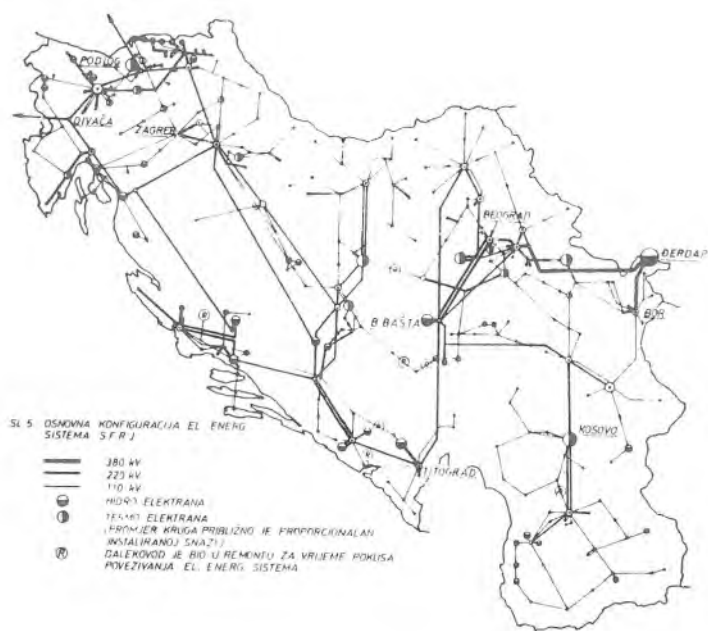
Tok snage na kritičnoj vezi (DV Bajina Bašta - Titograd) između istočnog i centralnog dijela el. energ. sistema Jugoslavije varirao je u toku pokusa

unutar ± 40 MW, osim 18.4. izmedju 16^{00} i 17^{00} , te 19.4. od 13^{00} do 14^{00} , kada je iznosio približno 100 MW.

Snaga razmjene na spojnomo 220 kV dalekovodu Divača - Padriciano, po isteku prelaznog procesa, održavana je na iznosu nula.

Automatska sekundarna regulacija frekvencija - snaga razmjene bila je trajno uključena.

Grupna regulacija napona u HE "Djerdap" bila je isključena.



5.2. Način priključka HE "Djerdap" na el. energ. sistem

Rasklopno postrojenje HE "Djerdap" daje mogućnost da se HE "Djerdap" promatra kao jedna proizvodna jedinica, pri čemu bi oba sistema 380 kV sabirnica bila povezana preko spojnog polja i priključena na el.energ. sistem preko 380 kV DV prema Beogradu i Boru. Druga mogućnost je da se HE "Djerdap" promatra kao dvije proizvodne jedinice Djerdap I i Djerdap II.

Indeks I pridat je generatorima priključenim na sistem sabirnica S-I, koje su na el. energ. sistem bile priključene preko 380 kV DV Djerdap - Beograd. Drugom sistemu sabirnica S-II, priključenim na sistem preko 380 kV DV Djerdap-Bor i generatorima vezanim na njih, pridat je indeks II. Generatori proizvedeni u SSSR-u označeni su kao A-generatori, a generatori proizvodnje "Rade Končar" kao B-generatori.

5.3. Opis prelaznog procesa nakon povezivanja izvršenog 18.4.1974. u 17⁵⁵

Za ilustraciju i prikaz utjecaja dodatnog regulacionog signala po frekvenciji odabran je kao karakteristični primjer slučaj povezivanja el.energ.sistema izvršen 18.4.1974. u 17⁵⁵.

U ovom, kao i u svim ostalim pokusima povezivanje je vršeno s malim odstupanjem frekvencija (0.05 Hz do 0.1 Hz) el. energ. sistema kako bi se dobile zadovoljavajuće amplitude njihovanja veličina stanja u toku prelaznog procesa.

Kod ovog pokusa HE "Djerdap" je bila podijeljena na dvije proizvodne jedinice. Djerdap I su sačinjavala 3 A-generatora, a Djerdap II 2 B-generatora. Povezivanje el.energ. sistema izvršeno je bez dodatnih regulacionih signala. Na sl. 6 prikazane su promjene karakterističnih veličina stanja generatora HE "Djerdap" i el.energ.sistema u toku prelaznog procesa. Za ovaj prelazni proces karakteristična su četiri intervala.

U prvom intervalu (cca 5 perioda) njihovanja veličina stanja su bila neprigušena s konstantnom amplitudom.

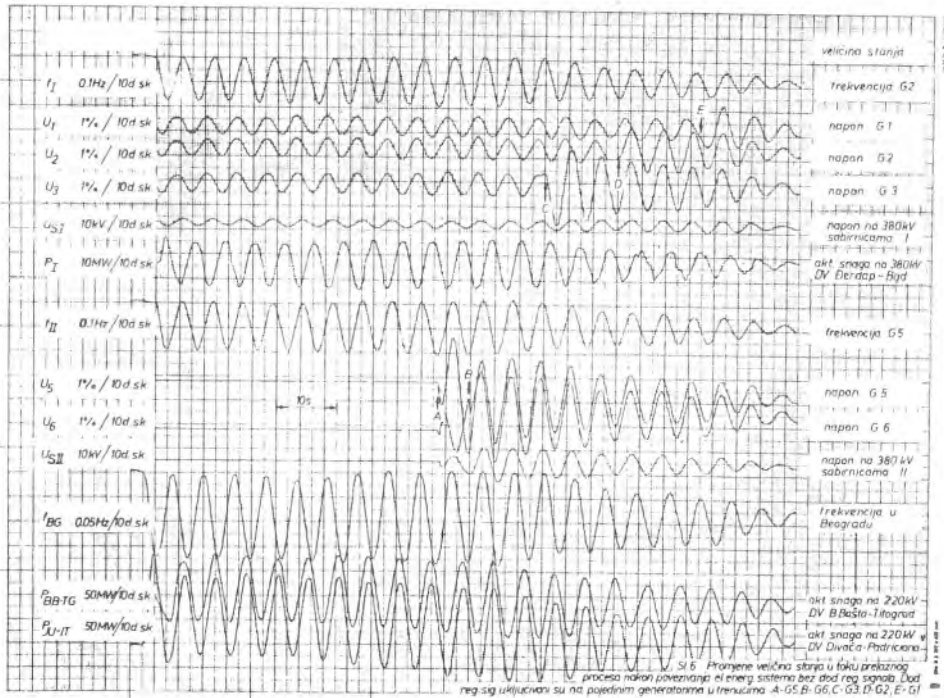
Za drugi interval karakteristična su takodjer neprigušena njihovanja, ali s rastućom amplitudom. Ovakav karakter prelaznog procesa bio je signal za uključivanje dodatnih regulacionih krugova.

Slijedeći interval je interval uključivanja dodatnih regulacionih krugova.

Na sl. 6 označeni su trenuci uključivanja dodatnih regulacionih krugova na pojedinim generatorima. Kad su oni uključeni, na oba generatora proizvodne jedinice Djerdap II promijenjen je karakter prelaznog procesa i postignut

pozitivni prigušni koeficijent. Kraj ovog intervala označen je trenutkom E, kada je i na posljednjem generatoru proizvodne jedinice Djerdap I uključen dodatni regulacioni krug.

U četvrtom intervalu imamo situaciju kakva će stvarno biti tj. uključene dodatne regulacione krugove na svim generatorima. Nakon trenutka E došlo je ponovno do povećanja prigušenja, a nakon nekoliko perioda praktički i do završetka prelaznog procesa.



Pojačanja u dodatnim regulacionim krugovima iznosila su u prosjeku oko 10 r.v. napona reference / r.v. frekvencije.

Ovaj pokus, kao i čitav niz pokusa izvršenih poslije njega s različitim varijantama priključka HE "Djerdap" na el. energ. sistem i u različitim periodima dana, pokazali su da se uz uključene dodatne regulacione signale uvijek dobije prelazni proces s pozitivnim prigušenjem. Ostvareno pozitivno prigušno djelovanje

nije nas zadovoljilo, pa su u smislu povećanja prigušnog djelovanja izvršene korekcije u dodatnim regulacionim krugovima. Za jedno zadovoljavajuće prigušno djelovanje, pojačanja u dodatnim regulacionim krugovima po frekvenciji iznosila su približno 15 do 20 r.v. napona reference /r.v. frekvencije.

Ovim zahvatima na HE "Djerdap" postignuto je pozitivno prigušenje el.meh. njihanja el.energ. sistema i osiguran kontinuirani paralelni rad s el.energ. sistemom UCPTE.

6. Popis oznaka

e	- napon generatora, r.v.
E	- napon krute mreže, r.v.
e_d, e_q	- komponente napona generatora u d i q osi, r.v.
i_d, i_q	- komponente struje generatora u d i q osi, r.v.
E_d, E_q	- napon proporcionalan magn. toku ulančenim uzбудnim namotom, r.v.
E_Q	- napon iza poprečne sinhronne reaktancije, r.v.
m_Q	- elektromagnetski moment stroja, r.v.
m_e	- moment pogonskog stroja, r.v.
m_T	- moment pogonskog stroja, r.v.
I_T	- uzбудna struja, r.v.
I_{fd}	- uzbudni napon, r.v.
E_{fd}	- uzbudni napon, r.v.
T_{fd}	- vremenska konstanta uzbudnog namota u ph, s
M^{do}	- konstanta inercije, Ws/VA
ω	- kružna frekvencija njihanja, rad/s
δ	- kut opterećenja generatora, rad
K_1, K_2, K_4, K_5, K_6	- konstante stanja
K_3	- impedantna konstanta
K^u	- pojačanje po odstupanju napona generatora
T^u	- vremenska konstanta sistema uzbude, s
Δ^u	- oznaka za prirast
r.v.	- relativna vrijednost
$T_1, T_2, T_3, T_4, K_{ST}$	- parametri stabilizatora el.energ.sistema

7. Literatura

- L1 Stojšavljević M., Ispitivanje kanala frekvencije, E 41194, "Rade Končar", Zagreb, 1973.
- L2 Stojšavljević M., Analiza utjecaja dodatnog regulaci onog kruga regulatora napona na stabilnost paralelnog rada dvaju elektro-energetskih sistema, E 86, "Rade Končar", Zagreb, 1975.

Dr Zvonimir Valković, dipl.inž.
Institut "Rade Končar"
Zagreb

ISTRAŽIVANJE ELEKTROMAGNETSKIH POLJA U TRANSFORMATORIMA

U uvodnom dijelu referata ukazano je na važnost istraživanja rasipnog magnetskog polja i dodatnih gubitaka za daljnji razvoj transformatora. Zatim su ukratko prikazani dosadašnji rezultati i metode istraživanja, s naglaskom na rezultatima koji su postignuti na tom području u Elektrotehničkom institutu "Rade Končara" u Zagrebu.

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN TRANSFORMERS

Research of the stray magnetic field and stray losses is of considerable importance in the development of transformers.

The outline of current research results and methods places particular emphasis on this line of study as pursued by the "Rade Končar" Electrical Engineering Institute.

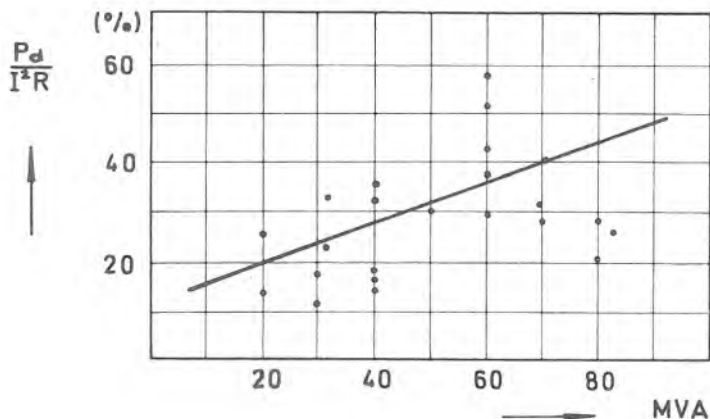
1. Uvod

Razvoj velikih energetske transformatora usko je povezan s rezultatima istraživanja elektromagnetskog polja, dodatnih gubitaka i lokalnih pregrijanja metalnih dijelova transformatora. Iako su i dosada postignuti značajni uspjesi na tom

području istraživanja, daljnji razvoj transformatora zahtijeva rješavanje još niza novih zadataka.

Ukupni gubici, koji se izmjere u pokusu kratkog spoja, mogu se rastaviti na dva dijela : osnovne gubitke (I^2R) i dodatne gubitke (P_d). Proračun osnovnih gubitaka je jednostavan i relativno točan, a proračun dodatnih gubitaka je kompliciran i nedovoljno pouzdan. Dodatni gubici mogu se najtočnije odrediti na osnovi statističke analize rezultata mjerenja većeg broja sličnih transformatora. Postojeće teoretske metode za proračun dodatnih gubitaka nisu ni dovoljno točne niti sveobuhvatne. Razlog tome je, vjerojatno, činjenica da na dodatne gubitke u transformatoru djeluje niz faktora čiji je utjecaj teško egzaktno uzeti u obzir prilikom proračuna.

Osim istraživanja, koja doprinose usavršavanju metoda proračuna, važna su i saznanja kako se i koliko mogu smanjiti dodatni gubici. Udio dodatnih gubitaka u ukupnim gubicima je, naime, značajan i zato se smanjenjem dodatnih gubitaka posti-



Slika 1 : Ovisnost dodatnih gubitaka o snazi transformatora

že bitno poboljšanje karakteristika transformatora (slika 1). Važno je također, a posebno za autotransformatore i transformatore vrlo velike snage, točno poznavanje prostorne raspodjele dodatnih gubitaka. Ponekad je prostorna koncentracija dodatnih gubitaka vrlo nepovoljna i zbog toga mogu nastati opasna lokalna pregrijanja metalnih dijelova i izolacije transformatora.

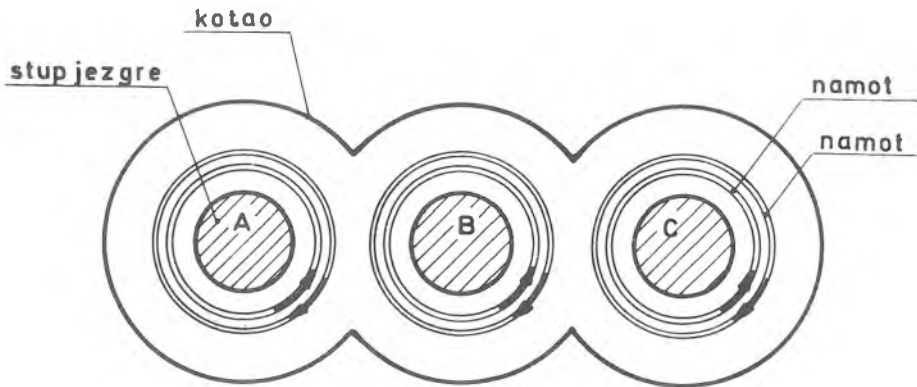
Uobičajena je podjela ukupnih dodatnih gubitaka na: dodatne gubitke u namotu, dodatne gubitke u kotlu i dodatne gubitke u ostalim metalnim dijelovima.

2. Dodatni gubici u namotu

Teoretske osnove za proračun dodatnih gubitaka u namotu, koji nastaju od aksijalne i radijalne komponente rasipnog magnetskog polja, razrađene su u literaturi (1). Većina projektanata transformatora je prihvatila tu metodu ili njene modifikacije. Međutim, iako je metoda opće prihvaćena, još uvijek ne postoje sigurni teoretski ili eksperimentalni dokazi o njenoj valjanosti. Ukupni izmjereni dodatni gubici su često i do nekoliko puta veći od izračunatih dodatnih gubitaka u namotu. pa se zbog toga ne može na jednostavan način mjerenjem provjeriti točnost proračuna. Moguć je, međutim, i drugi način provjere. Točnost proračuna može se, naime, provjeriti i na osnovi detaljnih teoretskih analiza osnovnih pretpostavki (zanemarenja) koje su učinjene pri razradi postojeće metode proračuna. U izvještaju (3) je, na primjer, analiziran utjecaj radijalnih kanala između svitaka u namotu na oblik magnetskog polja i dodatne gubitke, a u (4) promjena polja po obodu namota i utjecaj te promjene na dodatne gubitke u namotu. Konstatirano je da je utjecaj radijalnih kanala na dodatne gubitke zanemariv, a utjecaj promjene rasipnog magnetskog polja po obodu namota, umjeren. Slična teoretska istraživanja bi trebalo nastaviti i kombinirati ih sa specijalnim eksperimentalnim provjerama.

3. DODATNI GUBICI U KOTLU

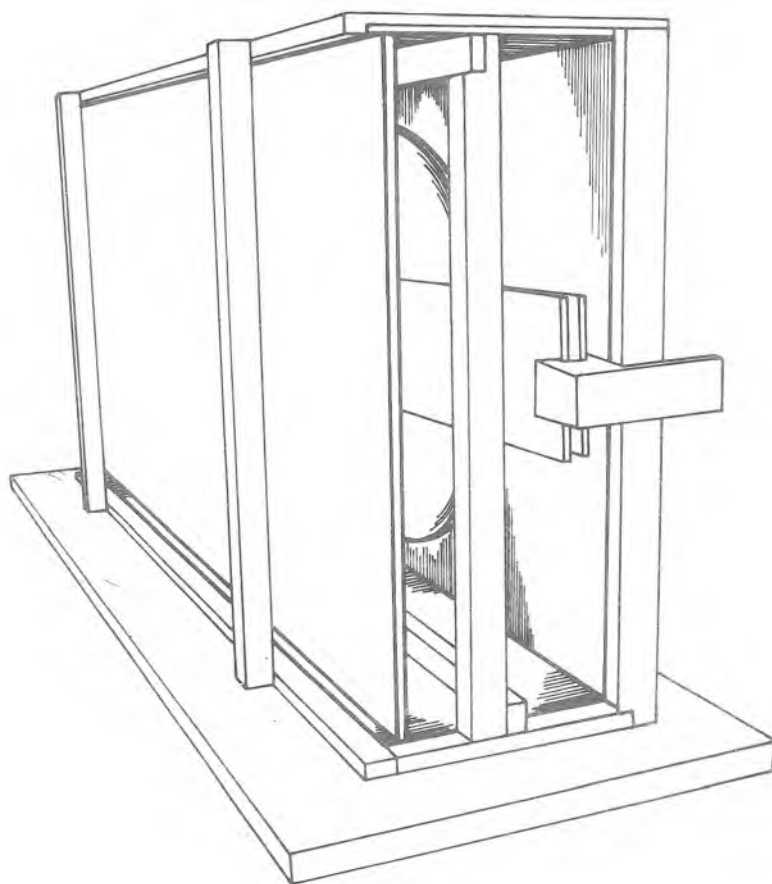
O rezultatima istraživanja dodatnih gubitaka u kotlu objavljeno je niz radova, a razrađeno je i nekoliko metoda za proračun tih gubitaka. Cjelovitiji prikaz dosadašnjih radova na tom području može se naći u literaturi [5]. Ipak, još uvijek nije objavljena pouzdana metoda za proračun gubitaka u kotlu, već postoji nekoliko metoda koje se međusobno znatno razlikuju. Prema tome, očito je da su potrebna daljnja istraživanja koja će biti osnova za razradu pouzdane metode proračuna.



Slika 2 : Trofazni transformator s ovalnim kotlom

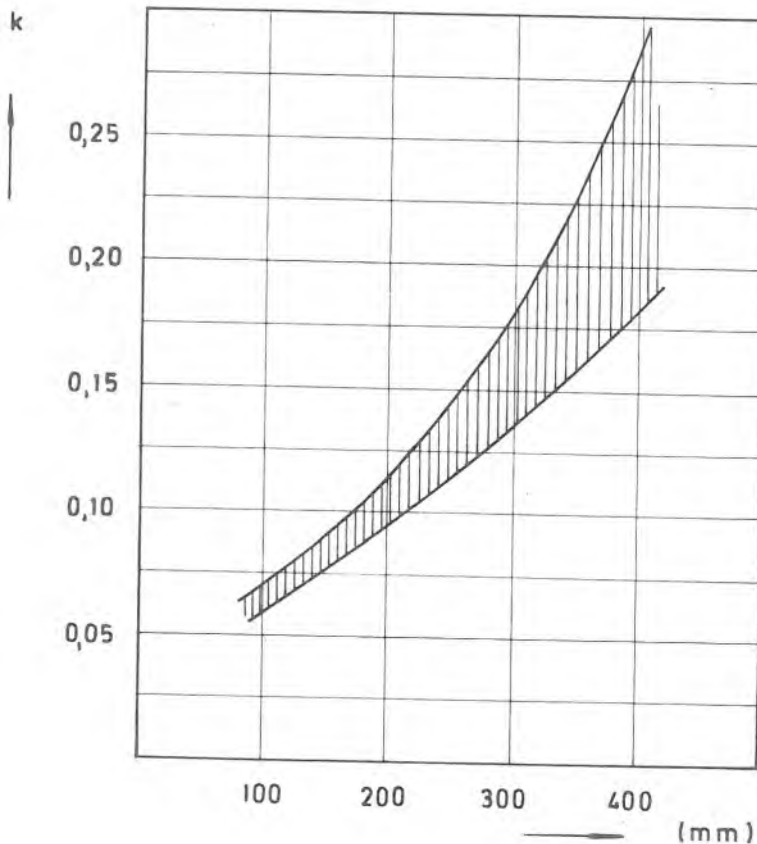
U literaturi [6] opisana je metoda za proračun gubitaka u kotlu trofaznog transformatora (slika 2) uzimajući u obzir: zakrivljenost namota, stvarni oblik kotla, trofaznu uzbudu, histerezu i nelinearnost. Da bi se mogao uzeti u obzir utjecaj svih tih faktora, učinjeno je niz pretpostavki, pa će zbog toga konačan zaključak o točnosti metode biti moguće donijeti tek nakon provjere na većem broju transformatora.

Budući da je mjerenje gubitaka u kotlu realnog transformato-



Slika 3 : Skica radijalnog modela

ra vrlo nepouzđano, a teoretski proračun kompliciran, često se primijenjuju specijalni modeli za eksperimentalna istraživanja. U literaturi [6] je, na primjer, opisan tzv. radijalni model (slika 3). Model je primijenjen za istraživanje gubitaka u kotlu i eksperimentalnu provjeru efikasnosti zaslona koji se postavljaju na stijenku kotla. Postoje dvije vrste zaslona : elektromagnetski (od aluminija ili bakra) i magnetski (od transformatorskog ili dinamo lima). Dio rezultata istraživanja pomoću radijalnog modela prikazan je



Slika 4 : Ovisnost koeficijenta zaslanjanja o širini paketa magnetskog zaslona

na slici 4 . Dana je ovisnost koeficijenta zaslanjanja o širini lima magnetskog zaslona. Koeficijent zaslanjanja (k) pokazuje na koji su iznos smanjeni gubici primjenom zaslona.

4. ZAKLJUČAK

Dosada su najtemeljitije istraživani dodatni gubici u namotu i kotlu transformatora, a vrlo je malo objavljenih radova o dodatnim gubicima u ostalim metalnim dijelovima. Provjera i usavršavanje postojećih metoda za proračun dodatnih gubitaka u namotu i kotlu, kao i detaljnije istraživanje gubitaka u ostalim metalnim dijelovima predstavljaju još uvijek vrlo značajne zadatke za daljnji razvoj velikih energetskih transformatora. Istraživanje prostorne raspodjele dodatnih gubitaka postat će naročito značajno u narednom periodu, jer je često važnije saznanje da li postoji opasna lokalna koncentracija dodatnih gubitaka nego točno određivanje iznosa ukupnih dodatnih gubitaka.

LITERATURA :

1. Dietrich W. : Berechnung der wirkverluste von Transformatorenwicklungen unter Berücksichtigung des tatsächliche Steufeldverlaufes ; Archiv für Elektrot., 1961, 4
2. Lovenjak M. : Proračun dodatnih gubitaka u zaslonu kotla transformatora metodom konačnih diferencija; Elektrotehnika, 1973, 3-4
3. Lovenjak M. : Utjecaj radijalnih kanala na skin-efekt; Institut "R. Končar", elaborat E31181, 1973
4. Lovenjak M. : Utjecaj promjene radijalnog polja po obodu vodiča na faktor skin-efekta; Institut "R. Končar", elaborat E31187, 1973

5. Turowski J. : Tehničeskaja elektrodinamika ; Energija, Moskva, 1974
6. Valković Z. : Analiza dodatnih gubitaka u kotlu transformatora; Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, doktorska disertacija, 1975
7. Valković Z. : Analiza efikasnosti zaslanjanja transformatorskog kotla; Elektrotehnika, 1976, 1

Mr. Vešić Petar, dipl.ing.
Elektrotehnički institut
"Rade Končar" - Zagreb

MJERNI TRANSFORMATORI ZA 400 kV-NU MREŽU SFRJ

Prikazana je koncepcija te statičke i dinamičke karakteristike mjernih transformatora stupnja izolacije Si 420 razvijenih i izrađenih po vlastitom rješenju u Poduzeću "Rade Končar", a namijenjenih za ugradnju u jugoslavensku mrežu 400 kV. Dani su nazivni parametri transformatora te dielektrička i mehanička svojstva transformatora, kao i osnovne dimenzije.

INSTRUMENT TRANSFORMERS FOR THE YUGOSLAV 400 kV NETWORK

Instrument transformers of specific static and dynamic characteristics for the highest system voltage (420 kV) have been developed and manufactured by the "Rade Končar" Enterprise. These transformers will be installed in the Yugoslav 400 kV network. Their rated parameters, dielectric and mechanical properties, and basic dimensions are given.

1. Uvod

U poduzeću "Rade Končar" razvijeni su i proizvedeni strujni i kapacitivni naponski transformatori za najviši pogonski napon mreže 420 kV, namijenjeni za ugradnju u mrežu 400 kV SFRJ.

Transformatori su građeni u skladu s Tehničkim zahtjevima Zajednice jugoslavenske elektroprivrede i propisima JUS i IEC, a mogu biti izrađeni i ispitani u skladu i s drugim propisima.

Razvoj transformatora je bazirao na teorijskim postavkama i proračunima te bogatom iskustvu stečenom kroz projektiranje i proizvodnju mjernih transformatora za 220 kV.

Ispravnost proračuna i projekata je potvrđena ispitivanjima na prototipovima i transformatorima iz serijske proizvodnje.

2. Zadaća mjernih transformatora u mreži 400 kV

Mjerni transformatori u svojoj osnovnoj namjeni imaju zadatak da transformiraju mjerenu struju, odnosno napon, u jednom praktički stalnom omjeru i gotovo bez faznog pomaka, na vrijednosti prikladne za mjerenje, te da mjerne instrumente i opremu izoliraju od visokog napona mreže koje se napon, odnosno struja, mjere.

Obzirom da se na naponskom nivou 400 kV prenose relativno velike količine energije, to i male pogreške prenosnog odnosa struja i napona ili mali fazni pomak između primarne i sekundarne veličine mogu izazvati velike greške u mjerenju energije, gledano u apsolutnom iznosu. Zbog toga se traži da ovi transformatori zadovolje relativno visoku klasu točnosti. Također je važno da je izolacija između visokonaponske mreže i sekundarnog dijela, odnosno zemlje dobro dimenzionirana da izdrži električka i mehanička naprezanja koja nastaju pri ispitivanjima ili mogu nastati u pogonu. Pouzdanost aparata na naponskom nivou 400 kV posebno je naglašena jer prekidi u prijenosu električne energije redovito izazivaju znatne materijalne štete.

3. Nazivni parametri mjernih transformatora

Prilikom izbora parametara mjernih transformatora vodilo se računa prvenstveno o zahtjevima koje je postavila Zajednica jugoslavenske elektroprivrede za mjerne transformatore, predviđene za mrežu 400 kV SFRJ.

U pogledu dielektričke čvrstoće transformatori su izrađeni za stupanj izolacije Si 420s₂, odnosno podnose jednominutni napon industrijske frekvencije 680 kV i udarni napon oblika 1,2/50 μ s od 1550 kV. Osim toga strujni transformator može izdržati dinamičku struju od 100 kA i termičku struju 40 kA (1 sek.) bez oštećenja.

Strujni transformator ima 4 jezgre slijedećih karakteristika:

broj jezgre	odnos transformacije	nazivna snaga	klasa točnosti	faktor sigurnosti
1	500-1000/1	15	0,2 ext.200%	10
2	800-1600/1	30	0,5	10
3	800-1600/1	30	5P30	-
4	800-1600/1	30	5P30	-

dok kapacitivni naponski transformator ima dva sekundara nazivnog napona $100/\sqrt{3}$ V i snage 30 VA u klasi 0,2 na prvom namotu i 100 VA u klasi 1/3P na drugom namotu, uz istovremeno terećenje. Kapacitivno djelilo ima pogonski kapacitet 4400 pF, vlastitu rezonantnu frekvenciju veću od 1 MHz i serijski nadomjesni otpor manji od 40 oma u frekventnom području od 40 do 500 kHz i za raspon temperatura od -25 do $+40^{\circ}\text{C}$. Transformatori imaju mogućnost priključka uređaja za visokofrekventnu vezu.

4. Izbor rješenja i izvedba transformatora

Pri izboru rješenja razmotreno je nekoliko varijanti s obzirom na točnost transformatora, pouzdanost, tehnološkičnost i cijenu transformatora.

Za strujni transformator odabrano je rješenje s primarnim namotom iz jednog dijela sa zatvorenom petljom. Shematski crtež transformatora dat je na slici 1. Primarni namot je izoliran kvalitetnim papirom proimpregniranim uljem. U izolaciju su ugrađene elektrode za kapacitivno diktiranje raspodjele potencijala. Time je postignuta približno jednaka jakost polja u svim dijelovima izolacije, odnosno bolje iskorišćenje izolacije i manje dimenzije transformatora. Krajevi elektroda su prikladno formirani na pažljivo odabranim mjestima tako da se ne premaše dozvoljena naprezanja na završecima i da se dobije povoljna raspodjela potencijala na granici izolator-zrak (2).

Kapacitivni naponski transformator se sastoji od visokonaponskog kapacitivnog djelila odnosa $400/\sqrt{3}$ kV na 15 kV i elektromagnetske jedinice. Za srednji napon (međunapon) je odabrana vrijednost 15 kV kao optimalni iznos, s obzirom na tehničke zahtjeve i cijenu elektromagnetske jedinice (3).

Kapacitivno djelilo je složeno od kvalitetnih kondenzatora i izrađeno rastavljivo u dva dijela radi lakšeg transporta. Shematski crtež transformatora vidi se na slici 2.

Oba tipa transformatora su hermetički zatvorena bez kontakta ulja sa zrakom i praktički pri konstantnom unutarnjem pritisku, zahvaljujući elastičnim membranama ugrađenim na glavi transformatora. Ove membrane dimenzionirane su tako da praktički bez povećanja pritiska kompenziraju promjene volumena ulja u cijelom radnom području temperatura.

3. Ponašanje mjernih transformatora Si 420 u prolaznim stanjima

Pri nenormalnim uvjetima koji mogu nastati bilo u mreži bilo u sekundarnom krugu mjernog transformatora, on mora ostati priključen na mrežu i ispravno raditi nakon prolaska takvog stanja, a pri takvim uvjetima ne smije biti uzrok krivog djelovanja zaštite. Najizrazitiji slučajevi nenormalnih uvjeta rada mjernih transformatora su kratki spoj u mreži i preopterećenje transformatora.

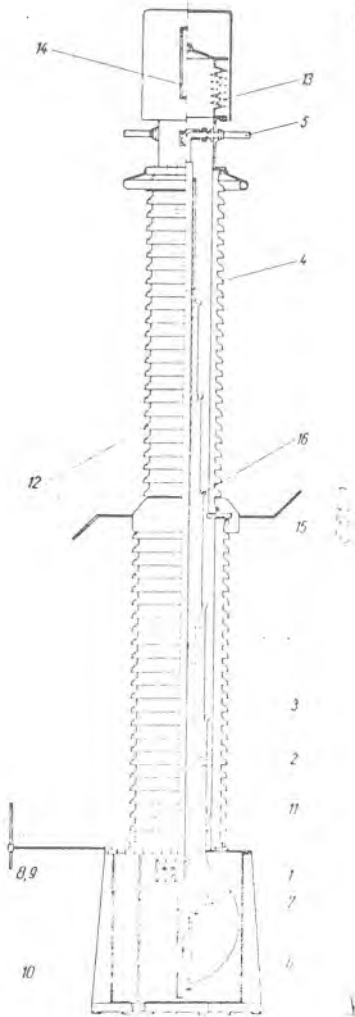
Kapacitivni naponski transformator predstavlja RLC krug s promjenljivim induktivitetom zbog promjene permeabilnosti željeza, pa je kao takav sklon ferorezonantnim i subharmoničkim titranjima. Kapacitivni transformator može doći u ovakvo stanje kod naglog rasterećivanja preopterećenog transformatora. Najizrazitiji slučaj je uklanjanje kratkog spoja sekundarnih stezaljki.

Da bi se spriječila trajna ferorezonancija, na posebni namot međutransformatora je spojen nepropusni filter za 50 Hz tako da ne opterećuje transformator u normalnim pogonskim uvjetima, a efikasno guši subharmonička i ferorezonantna titranja. Od veličine filtera ovisi efikasnost gušenja. Međutim, veliki filter znači veliku akumuliranu energiju u njemu što može bitno pogoršati odziv transformatora kod primarnog kratkog spoja. Očito je da se mora odabrati kompromisno rješenje. Najbolje rješenje predstavlja filter koji se uključuje u sekundarni krug transformatora samo u slučaju nastanka ferorezonantnih ili subharmoničkih titranja. Takav filter može biti vrlo efikasan a da istovremeno ne pogoršava odziv transformatora kod primarnog kratkog spoja.

Strujni transformatori 2APU 420 građeni su s klasičnom jezgrom s relativno velikom vremenskom konstantom sekundarnog kruga. U slučaju kratkog spoja u mreži u trenutku prolaska napona kroz nulu, istosmjerna komponenta struje kratkog spoja može stvoriti vrlo nepovoljne magnetske prilike u jezgri i velike pogreške transformacije za vrijeme trajanja prelazne pojave, naročito ako je jezgra opterećena nazivnom snagom i ako je vremenska konstanta opadanja istosmjerne komponente struje velika (7). Zbog toga jezgru, koja se koristi za priključak distantne zaštite s vrlo malim vremenom djelovanja, treba opteretiti što manje.

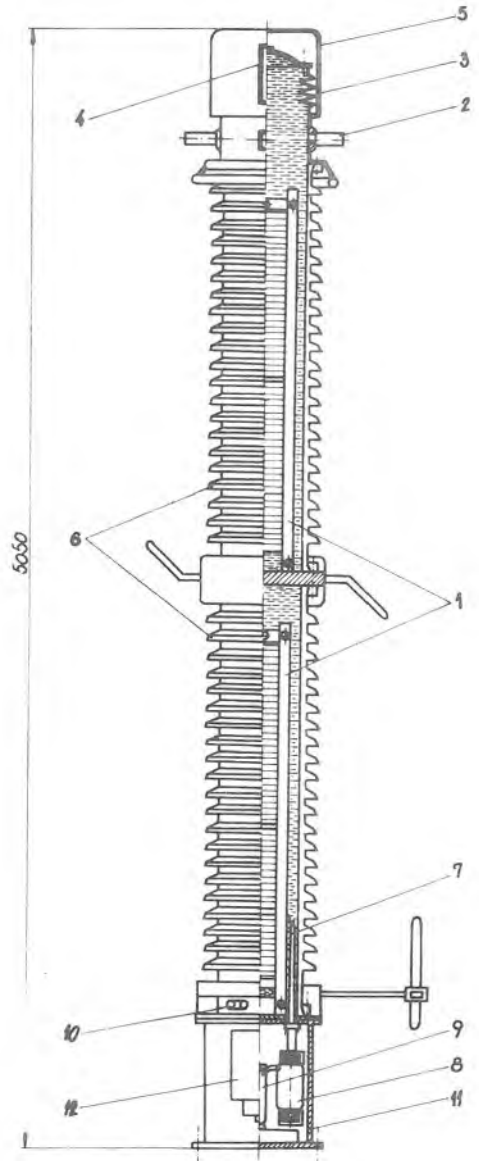
6. Literatura

- (1) Ivanković, I., Karakteristike strujnog transformatora APU 420, X stručno savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, 1970, Referat br.12.01
- (2) Ivanković, I., Strujni transformator za Si 420, Informacije "Rade Končar", br. 2/1976.
- (3) Kelemen, T., Stacionarna i prolazna stanja kapacitivnog naponskog transformatora VCU-420, X stručno savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, 1970, Referat 12.02
- (4) Kelemen, T., Ferorezonancija i subharmonička titranja u kapacitivnom naponskom transformatoru, XII stručno savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, 1975, Referat br.12.08
- (5) Kelemen, T., Proračun i analiza vjernosti prenosa kapacitivnog naponskog transformatora u slučaju trenutnih promjena napona mreže, Disertacija, Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, 1974.
- (6) Vešić, P., Transformacija asimetrične struje kratkog spoja u strujnom transformatoru s klasičnom i lineariziranim jezgrom, V simpozij o prenosnoj mreži SFRJ, 1973, Referat br.II-1
- (7) Vešić, P., Prolazno stanje u strujnom transformatoru kod kratkog spoja u mreži, Elektrotehnika (Beograd), br.11/1975. Informacije "Rade Končar", br. 64/1975.
- (8) Vešić, P., Istraživanje karakteristika strujnih transformatora s lineariziranim jezgrom u stacionarnom i prolaznim stanjima, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, 1973.



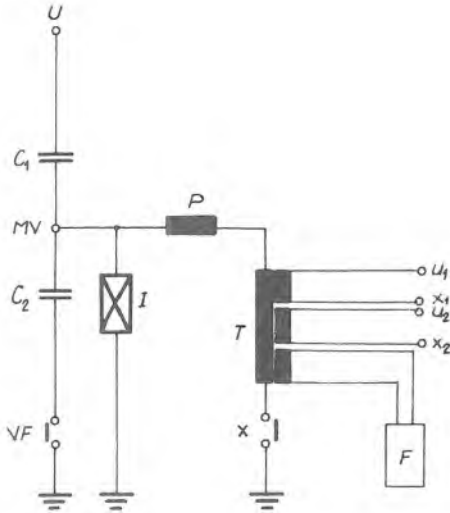
Slika 1. Strujni transformator
2APU 420

1 primarni namot, 2 izolacija, 3 elektrode, 4 izvod primarnog namota, 5 priključci primarnog namota, 6 mjerna jezgra, 7 namot mjerne jezgre, 8 i 9 zaštitne jezgre s namotima, 10 kotao, 11 priključci sekundarnih namota, 12 porculanski izolator, 13 membrana, 14 pokazivač nivoa ulja, 15 rogovi za zaštitu od prenapona, 16 krajevi elektroda

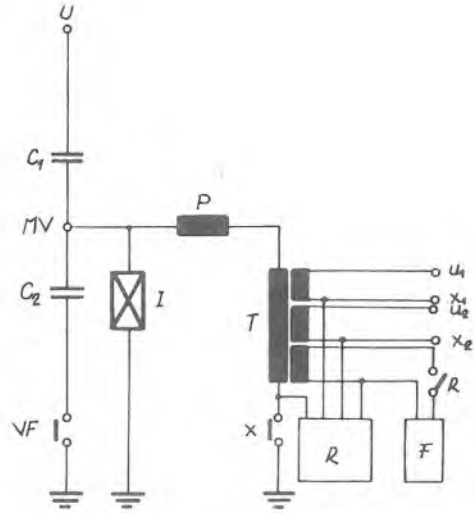


Slika 2. Kapacitivni naponski
transformator VCU 420

1 kapacitivno djelilo, 2 visokonaponski priključci, 3 membrana, 4 pokazivač nivoa ulja, 5 poklopac membrane, 6 porculanski izolatori, 7 izvod međunapona, 8 prigušnica, 9 međutransformator, 10 priključak za VF, 11 kotao, 12 sekundarni izvodi



Slika 3. Shema spoja kapacitivnog naponskog transformatora s trajno uključenim filterom za gušenje ferorezonantnih i supharmoničkih titranja



Slika 4. Shema spoja kapacitivnog naponskog transformatora s uređajem za uključivanje filtera samo u slučaju pojave ferorezonantnih ili supharmoničkih titranja

C_1 visokonaponski kondenzator, C_2 međunaponski kondenzator, P serijska reaktanca, T međutransformator, I iskrište, F filter, VF priključak za visokofrekventnu vezu, R uređaj za uključivanje filtera u slučaju pojave ferorezonantnih i/ili supharmoničkih titranja. U visokonaponski priključak, u_1 , x_1 i u_2 , x_2 sekundarni priključci.



Charles Concordia
Consulting Engineer
Venice, Florida, U.S.A.

DEVELOPMENT OF ELECTRIC POWER TRANSMISSION NETWORKS

Introduction

Among Nikola Tesla's many technical interests and contributions, were his early advocacy of, and contributions to, a-c electric power transmission. This has turned out to be of the greatest significance for the development of the electric power industry, as is shown by the present practically universal use of a-c overhead transmission and the widespread a-c networks that interconnect electric power generating stations not only nationally but in many cases also internationally.

While we cannot claim that Tesla foresaw completely the development of electric power networks to their present form and vast extent, it is indeed fortunate that the a-c choice was made at an early stage.

It thus seems appropriate to include a general discussion of transmission networks in this Symposium. We shall discuss in turn: the reasons for interconnection, criteria for assuring adequate transmission strength, appropriate transmission voltages, transmission line design problems, and some aspects of operation. In view of this very broad scope the treatment of each aspect will necessarily be very brief and greatly simplified.

Benefits of Interconnection

The benefits of interconnection are very great, and they are obtained at a relatively very low cost. When the costs of electric service are segregated, the cost of transmission is usually found to be only about one-quarter to one-third of that of either generation or distribution, being typically less than 15% of the total. On the other hand, an adequate interconnecting transmission system can provide substantial savings.

This can be done in two ways: first, by pooling generation reserve and thus permitting the use of either larger (and therefore less expensive) generating units, or (if larger generating units are not available) less generation reserve; and, second, by permitting the exchange of energy between different regions to take advantage of differing operating costs or of differing load patterns, in order to achieve a more economical operating mode. We shall call the first way the "reserve aspect" and the second way the "energy aspect".

While both of these ways are important, we believe that the first, namely achieving the desired degree of reliability with a smaller total cost of generation, is the more important, in the sense that it can result in the greatest savings for a given desired degree of reliability. (It is of course also correct to point out that one can improve system reliability by interconnection. However, we prefer to speak here of the cost of achieving a specified degree of reliability, since this allows a quantitative evaluation of benefits without the necessity for the very difficult task of assigning a value to reliability itself.)

The quantitative benefits of interconnection from the aspect of reserve and reliability can be, and nowadays usually are, evaluated from a probabilistic viewpoint by calculating the optimum generating-unit size and the reserve (or installed capacity) required to serve the peak load with a given probability of success, or, as it is usually stated, with a probability of not being able to supply the peak load (the so-called "loss-of-load-probability") no greater than a specified value (often taken as one day in ten years).

Adequate Transmission Strength

This calculation tacitly assumes what we have called an adequate transmission network. By this we mean an installed network that not only has its own sufficiently high probability of not having too many lines simultaneously out of service, so as to be able to carry the required line loadings satisfactorily, but can also successfully withstand the unscheduled sudden loss of any major line without exceeding emergency loading limits or causing the tripping of any other lines. Further, when a transmission line is lost, it is usually because of a fault or other disturbance that imparts a shock to the system, which the system must be able to

withstand successfully before one can even consider that there is a valid post-fault condition to test. Similarly, the unscheduled loss of a generating unit may be, and usually is, occasioned by a fault and the switching out of the faulted line. This also produces a major disturbance that the system must survive.

Thus the probabilistic studies of system adequacy briefly mentioned above must be accompanied by dynamic studies of system performance in order to translate the transmission capability requirements into terms of actual line and system physical parameters.

When one considers the sudden loss of the largest generator as a contingency to be provided for in system planning and design, it becomes evident that there is a lower limit to the power capacity of a proposed interconnection between two areas below which the interconnection may not be desirable or even feasible. That is, since in large widespread networks, such as exist in the U.S.A. and Europe, any one power system is likely to be a relatively small part of the total connected generating capacity, a major part of the generation deficiency caused by the loss of any generator will be, at least at first, supplied by the other systems, and thus must flow over the interconnecting transmission lines. If this surge of power is beyond the capability of the lines, they will be switched out of service just when they are needed.

If the system in trouble had been importing power just before the loss of generation, the situation would actually be worse than if there had been no interconnection, since the loss of generation would be increased by the amount of power being imported.

Sometimes interconnections are desired primarily for the exchange of relatively small amounts of energy. However, considerations of reliability would still dictate that the capacity of the tie-lines be above the limit as determined from these considerations.

In such a case we should feel that the tie-line strong enough to contribute to reliability would be very much worthwhile. However, if it is desired to restrict the size of the tie to that required only for energy transfer, it can still be utilized in the form of a direct-current link. Perhaps the best-known example is the d-c link connecting Great Britain and the European continent. For such

applications, direct-current electric power transmission has reappeared with the past 25 years.

Other applications for which d-c transmission has been used are: long under-water links, transmission from very remote generating sites without the probability of load developing later along the right-of-way, and certain cases of distribution to load centers in large cities. This reappearance of d-c transmission is not to be interpreted as an indication that the decision to develop primarily a-c networks was mistaken. Instead, d-c has so far found application only in special situations. It has been made economically feasible in these situations by relatively recent developments in converting equipment and control.

A d-c link normally responds only as determined by its control, so that its power transfer can be made to a considerable extent independent of system conditions. Thus it need not become overloaded when a generator is lost, no matter how small it is, and can usually continue to supply power to the system in trouble. (Of course, an a-c tie of adequate capacity would be of active assistance by inherently supplying more power.)

The most usual case is that interconnections are made for both reasons, pooling of generation reserve and energy interchange. Then we must realize that the capacity of a tie-line when it is already transmitting power now must be defined in terms of its "pick-up" capacity. That is, we cannot install a tie-line having only enough total capacity to be able to carry the load of the largest generator suddenly thrust upon it, and then load it up to that capacity by normal energy interchange. Instead, the capacity must be large enough so that the tie-line still has sufficient capacity to pick up the emergency load even when it is carrying its maximum scheduled interchange power.

This may seem obvious, but instances have occurred in which a tie-line was originally installed for pooling of generation, and later on advantage was taken (as it should be) of the presence of the tie to exchange energy without a full realization that the contribution to reliability was thereby being at least reduced and possibly eliminated.

This discussion provides a way of interpreting in physical terms the required tie-line capacity that we might find, e.g., in a two-area load-of-load

probability study. It shows further that the total tie-line capacity required depends not only upon the generating unit size but also upon the proposed modes of operation. Indeed, we can define a "strong" network as one that puts no limits on one's freedom to dispatch generation in the optimum pattern.

There is often a distinction made between the transmission network interconnecting the generators of a given power system and the transmission tie-lines connecting that system to other systems. This is really an artificial distinction, based at least in part on the intention to operate the systems independently, with scheduled interchanges of power, rather than as a single dispatching area, with power being allowed to flow freely as required.

Optimum Network Size

We have mentioned the tendency to increase the extent of networks almost without limit. If one thinks in terms of probabilistic studies of generating-unit size and installed reserve, then in view of the fact that generating units are only available up to a certain maximum rating at any given time, it has seemed to some that after a certain network size is reached it is not necessary or even desirable to increase it any further. That is, the generators are already a sufficiently small percentage of the total system size, so that further increases in system size would not result in appreciable savings.

However, when we consider the physical network and the dynamics of loss of generation we can see that systems at the periphery of the network may find it more difficult to provide adequate tie-line capacity than do those in the interior. Therefore, these peripheral systems may find it desirable from their own point of view to connect in more than one direction. Ideally, each system would like to be at the center of a large network, so that it can connect in any direction, even though it does not need the network to be infinitely large. The result is that, for local reasons, the network continues to expand until it reaches a natural barrier. In the U.S.A., for example, such natural barriers are the oceans and, to some extent, the Rocky Mountains.

Even though the design of an adequate transmission network should be formulated on the basis of probabilistic, network, and dynamic studies such as

we have discussed, it is useful to have some notion of orders of magnitude, and some rules of thumb, for guidance. One measure of the strength of network is its voltage level. Based on our observations of the performance of many power systems and on our own concept of what seems reasonably to be good practice, we have come to the almost obvious conclusion that the appropriate network voltage level as a function of the size of the largest installed generating units can be expressed by the simple formula:

$$KW = 4 KV^2$$

which states that the largest generator should be just slightly greater than the surge impedance loading of the lines. Table I shows this approximate relation for some present and projected voltage levels.

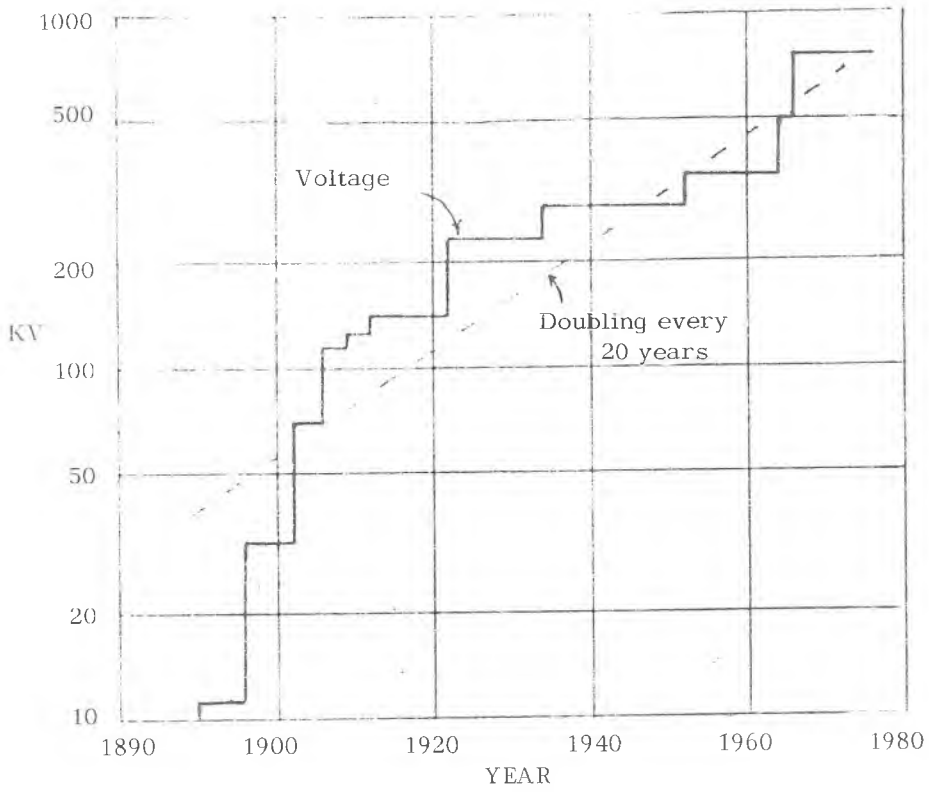
Table I
RELATION BETWEEN LARGEST GENERATOR SIZE AND APPROPRIATE NETWORK
VOLTAGE LEVEL

<u>MW</u>	<u>KV</u>
200	230
500	345
650	400
1 000	500
2 500	765
5 000	1 100
7 000	1 300

This table makes it appear that from the standpoint of capacity, the technology of transmission is at the moment somewhat ahead of the technology of generation. That is, 765 KV is already here, and 1,300 KV is considered feasible, while the 2,500 MW generator has not arrived (although it too is considered feasible).

Growth of Transmission Voltage

In general, transmission voltages have been available as required, although the rate of growth has been by no means uniform. Figure 1 shows that in North America the maximum voltage level grew from about 11 KV to 138 KV



MAXIMUM TRANSMISSION VOLTAGE IN NORTH AMERICA

Figure 1

(over 10 times) in twenty years from about 1890 to 1910. Then the growth was much slower, from 138 KV to 345 KV ($2\frac{1}{2}$ times) in slightly more than 40 years from 1910 to 1950. Just recently there has been another spurt in maximum voltage levels so that it has again more than doubled, to 765, in about 15 years, from 1952 to 1967.

Since we should expect generator size to be roughly proportional to system size, and since transmission capacity varies as the square of the voltage, we should expect the network voltage level to double when the load has quadrupled. Further, most economic studies have shown that one should not change the voltage level in too small steps, but should at least double it at each stage. This means that any serious study of network transmission should consider a period at least as long as that required for the load to quadruple in order to include the full development of the network voltage level. In the U.S.A., since load has been doubling roughly every ten years, this means that the study should extend over at least 20 years.

For the same reason we should expect the maximum voltage level to double every twenty years, and Figure I shows that very roughly this is indeed the case when we include the very recent increases to 500 and 765 KV. However, even as late as the early 1960's we should have had to conclude either that voltage levels were probably not keeping up with requirements, or that they may have been developed more rapidly than was really necessary in the first decade of the 1900's.

Advantages of Standardization

Another conclusion that one might draw from Figure I is that there have been, and are, too many voltage levels. Instead of an orderly doubling of voltage, there are such voltages as 115, 138, 161, 230, 287, 345, 500, and 765 KV, and, in other parts of the world, 300, 330, 400 KV, and others. In the U.S.A. there is at least one instance of lines of 230, 345, and 500 KV coming from the same generating station.

Voltages seem to have been developed at first almost independently, so that several different nearby levels appeared. There has been almost general agreement on the 230 KV level, but this appears to be the only voltage with that distinction.

At present there appear to be two major series of voltages in the range of high-voltage transmission: 230, 500 KV and 138, 345, and 765 KV. This would be all right if the utility companies were not interconnected, but presents difficulties when they are. Aside from the cost of transformers, they have a relatively high impedance, being generally equivalent to more than 50 miles of transmission line, for the same power capacity. Thus it is much more difficult to construct a strong (i.e., low impedance) transmission network when it is necessary to connect through transformers, even auto-transformers. It would have been much wiser to have foreseen the ultimate coming of the large interconnected network, and to have agreed on common voltage levels, rather than to pick voltages as optimum for one's own power system.

The situation is somewhat the same in Europe. After considerable effort there was almost general agreement on the 400 KV level, but there seems now to be again a diversity of opinion as to the next higher step. We hope that agreement can be reached, as it seems to us that practically any reasonable common voltage would be preferable to different voltages, as might be found to be optimum country by country.

Transmission Line Design

The development of higher and higher transmission voltages has been the result of a continual research and engineering effort over many years. However, the critical problems have undergone changes. At the beginning the protection of the transmission lines against lightning, to which Tesla contributed, received great attention. Later on, as operating voltages increased, switching surges became more important. Still later, as voltages became even higher, the problem of insulator pollution became recognized as important.

All of these may be regarded as internal problems in the sense that they are related directly to the economic and technical performance of the line in performing its useful function of transmitting electric power effectively. More recently, as the vast extent of networks has made transmission lines a prominent feature of the landscape, and as concern for environmental quality has become more vociferous, there has grown up a body of external problems.

One of the first of these was radio interference, which appeared as a limiting factor with the arrival of 345 KV and 400 KV lines. Then, as voltages increased to over 700 KV, audible noise became in turn a limiting factor. Both of these external limitations have now commonly become limiting factors in high-voltage transmission line design, especially as concerns the specification of bundled conductors. At the same time the physical appearance and routing of transmission lines have become subjects for debate and intervention by some groups.

The most recent development is a renewed concern for safety, particularly as it may be related to electrostatic and electromagnetic effects. In fact, at very high voltages, electrostatic effects have in some cases been thought to determine the limiting ground clearance.

These external problems, particularly including those of appearance and routing, are not subject to exact solutions, such as were just beginning to be obtained for the "old" technical and economic problems. However, this does not mean that scientific methods of network planning and transmission line electrical design are less useful. Instead, the modern probabilistic methods of coordinated studies of line clearance requirements from the standpoint of lightning, switching, and normal-voltage pollution performance have in many cases resulted in more efficient and compact line designs that are thereby more acceptable from the esthetic standpoint.

As a corollary, there are many older lines in service that may not have been designed so efficiently and thus can be uprated to a higher voltage level and load-carrying capacity with no increase in the impact of their appearance. Further, it is always very useful to know the best economic and technical solution even when political and social pressures may force temporary deviations from it. At the same time, it is important to devote more effort to selling the general public on the vital role of transmission in maintaining reliability and reducing energy consumption.

Operation

While the growth of large electric power networks has contributed greatly to the maintenance of reliable electric power supply at relatively low cost, it has made the effective operation of these networks a much bigger job.

One would like to operate at nearly constant frequency and voltage, maintain continuity of supply in spite of transient faults and most disturbances, schedule equipment maintenance optimally, be kept aware of all important network and equipment conditions (especially those that may affect operating limits), and finally, operate at minimum cost within the limits dictated by the other considerations.

All of these aspects of operation arise as soon as more than a few generating units are connected together. However, as the size of networks increases, in number of generators and in number of lines, their implementation becomes more complex. Frequency and voltage control, the control of tie-line power transfers, the automatic economic dispatch of generation taking proper account of security limits, the commitment of generating units, relaying for proper system protection, checking the system for margins of security, and ultimately just keeping track of the network conditions so that the other functions can be properly performed, all become beyond the capability of even the best conceivable operating staff.

Thus, paralleling the development of the electric power networks, there have been many developments, both in theory and practice, of automatic means for accomplishing most of these functions. While a great deal of this development has resulted in automatic control, we should like to emphasize here the job of simply gathering the significant information, from all over a large and geographically widespread network, in one place in order to permit analysis that can form a sound basis for major operating decisions and actions, whether manual or automatic, as this field of telecommunications was one to which Nikola Tesla made early contributions.

A major purpose of monitoring the network conditions is to confirm that it is in fact operating within the limits as planned to assure an adequate margin of reliability. In a large network this may require knowledge of, for example,

many different line and generator loadings, as well as of the actual lines and generators in service. Because of the large number of lines that may exist, in spite of the capabilities of modern signal transmission and computers, it is not practical to keep track of all of these in detail. Thus, it is necessary to have obtained a good understanding of system behavior from previous off-line performance studies in order to discriminate among the data with respect to the frequency and detail of monitoring. On the other hand, it must also be realized that some of the most significant information (for example, regarding major unscheduled outages of plant or transmission) may come from other systems that can be very distant.

Cooperation

Aside from the technical capability to manage and operate a large network, it is essential that there be a common understanding and appreciation of system problems among the many different electric utility companies that are participating. In the U.S.A. there was formed many years ago (in fact, before much of the country was effectively interconnected) the North American Power System Interconnection Committee (NAPSIC). This is an informal but very effective organization of all utilities, for the discussion of operating problems and for the establishing of guidelines for operation during both normal and emergency conditions. More recently, in 1968, the National Electric Reliability Council (NERC) was formed "to augment the reliability and adequacy of bulk power supply of the electric utility systems in North America. NERC consists of nine regional reliability councils comprising essentially all of the electric power systems in the U.S.A. and in four provinces of Canada." We are not so familiar with the somewhat similar organizations in other parts of the world, except for the Union for the Coordination of the Production and Transport of Electric Power (UCPTE) in western Europe.

Concluding Remarks

In this paper we have tried to give a very broad picture of the development of large electric power transmission networks, stressing what we believe should be the general principles of network planning, design, and operation rather than specific engineering accomplishments. These accomplishments have been well documented. We have discussed transmission principally from the standpoint of its role in forming large integrated networks rather than as long-distance transmission from remote generating sites. We believe that electric power supply will continue to grow and develop in the form of these large networks of overhead a-c transmission lines for many years to come.

We have noted that the Symposium announcement mentions Nikola Tesla's conviction that each product of electrical engineering should be regarded from the viewpoint of its contribution to the whole, and it is in this spirit that we have chosen to discuss the transmission network as a whole rather than details of its components.

x x x x x

Malden V. Frank, P.E.
Niagara Mohawk Power Corporation
300 Erie Boulevard West
Syracuse, New York

FROM ADAMS STATION TO USA'S INTEGRATED UTILITY SYSTEM

The historical review of the integrated electric utility system on the North American Continent begins with Tesla's discovery of the Polyphase AC System. The first commercial application of this principle was made by the Niagara Falls Power Company, a predecessor of Niagara Mohawk at the Adams Hydro generating station in Niagara Falls, and a 35 km 11 kV transmission line to the city of Buffalo. The developments leading to the merger of over 500 predecessor companies into the present System are described followed by a description of the New York Power Pool, and the Northeast Power Coordinating Council. Nine regions comprise the National Electric Reliability Council and are described with statistics on USA's utilities. The review ends with a tribute to Nikola Tesla.

1.0 INTRODUCTION

Tesla made many discoveries, however he is best known for his works on the Polyphase AC System which has become the foundation of today's modern electric utility system.

2.0 ADAMS STATION

2.1 Development

To find out how and where the "Age of Electricity" began, we must go back 90 years and 7,500 km West to Niagara Falls, one of the "Seven Wonders of the World". Niagara Falls is located in the western part of New York State, on the 60 km long Niagara River which originates in Lake Erie, flows into Lake Ontario, and forms the boundary between Canada and the United States. The Falls are 37 km below the origin of the Niagara River. Goat Island at the Falls divides the river. The Canadian Horseshoe Falls on the west branch and the American Falls on the east branch, have a drop of 50 m.

At the Cataract City of Niagara Falls in 1886, a group of pioneers formed a corporation named "NIAGARA FALLS POWER COMPANY".

The purpose of the company was to harness the waters of Niagara Falls and construct a central hydro plant, to transform the vast energy of the Falls into electric power. With Tesla's discovery of the Polyphase Alternating-current System, the stage was set to build a power house and a transmission line to the city of Buffalo. This was done under the leadership of Edward D. Adams as President of the Cataract Construction Company and Director of the Niagara Falls Company. The generation station was later named "Adams Station". A 35 km 11 kV transmission line was built between Niagara Falls and the 250,000 people of the city of Buffalo. This was the first application of a large scale polyphase AC system, devised by Tesla.

2.2 Power House

In April of 1895 the first 3,750 KW, 25 cycle, two phase generators, manufactured by the Westinghouse Corporation, began turning. In August of the same year the first customer, Pittsburgh Reduction Co., now known as ALCOA received electric power from the Adams station. By the year 1899 power house No. 1 was completed with ten generators. A second power house with eleven additional generators was completed by 1904, with a total capacity of 78,750 KW. Each generator displayed a name plate with all of Tesla's AC System patents. The station operated successfully until its retirement in 1961 and was then finally demolished in 1963.

2.3 Transmission Line

On November 15, 1896 at midnight, the city of Buffalo, 35 km from Adams Station, received the first alternating current over the 11 kV transmission line, to light its streets and drive its street cars. Mayor Jewett turned the switch and proclaimed to the world, that electric light and power could now be carried to every home and that one of the greatest discoveries of mankind

had resulted from the efforts of the Niagara pioneers.

3.0 GROWTH

3.1 Generation System

The demand for power grew fast and additional capacity was needed. Rankine Station on the Canadian side of the Falls was followed by the Schoelkopf station on the American side, below Rainbow Bridge. The 337 MW Schoelkopf station was completed in 1924. In 1948, 160 MW additional capacity was added. Due to a rock slide on June 7, 1956, two of the three sections were destroyed. The remainder of the station was retired in 1961 and demolished when the Moses Niagara Hydro Station and pump storage facility, owned by the Power Authority of the State of New York, started operation. The Moses Niagara Plant with its 13 generators has a total capacity of 2,400 MW.

3.2 Transmission System

The first transmission lines may be compared to distribution lines of today. They were constructed from wood poles, short spans, copper conductors and "HELMET" type pin insulators. As the generation system grew, so did the transmission system. More and larger transmission lines, using windmill towers for support were constructed at the beginning of the 20th century. Soon they were replaced by the first lattice type tower with four legs, using steel angles. When suspension type insulators were introduced in 1907, thru the combined efforts of Buck of the Niagara Falls Power Company and Hewlett of the General Electric Company, the stage was set for higher voltages required to transmit more power over longer distances. The pipe type structures used crossarms for greater separation. Voltage increased to 69 kV and 115 kV. The steel flex type tower was next used as the most economical type of construction. Many of these towers have been in operation

for almost 70 years. Steel and wood structures were in competition from the beginning. By 1916 with the first publication of the National Electric Safety Code, the era of regulation of transmission line systems began. Early substations were built of the box beam and column type construction and in the cities they were constructed inside of brick buildings.

4.0 NIAGARA MOHAWK SYSTEM

4.1 General

Niagara Mohawk Power Corporation, formed on January 5, 1950, from three principal companies is the end product of over 500 small utilities in upstate New York which over the years merged their systems into larger companies.

Today, Niagara Mohawk is one of the 14 largest completely integrated investor owned electric utilities in the United States. Its electric service territory reaches from the Niagara Frontier in the west of New York State, to the Hudson River Valley in the east, from the Canadian border in the north, to the Pennsylvania border in the southwest. The electric service area covers 62,000 km² with an approximate population of 3,700,000. It also has a natural gas service area which covers 11,700 km² with a population of approximately 1,800,000. The electric service area extends to 37 counties, 670 cities, towns and villages, with a total of 1,219,400 residential, commercial and industrial customers. The operation of the company is divided into three divisions with 13 general areas, totaling 8,900 employees. The Corporate headquarters and the seat of the Central Division is located in Syracuse, which has a metropolitan population of approximately 500,000. It is located in the center of the State and the company's service area. The headquarters consists of a complex of 4 interconnected buildings. The main building which was completed in 1932 is in the Art Deco

style. The newest building, completed in 1974 has a glass exterior and is entirely electrically heated and air conditioned. Here, centralized computer services consisting of 2-IBM 370 computers are located to perform many of the daily required computerized services. The largest service center in Syracuse, houses central stores and a power control center from which the entire System's operation is monitored, controlled and linked to the New York Power Pool. The Western Division headquarters is located in Buffalo, an industrial city of 1,200,000 people located on Lake Erie. The office building is a replica of the Power and Light building from the Panamerican Exhibition in 1902 in Buffalo. The Eastern Division headquarters is located in Albany, the capital of New York State.

4.2 Generation System

Niagara Mohawk's production capability in 1976 reached 7,330 MW; of this 1,470 MW or 20% is coal fired; 2,090 MW or 28% is oil fired; 355 MW or 5% is gas and diesel fired; 728 MW or 10% is nuclear; and 2,687 MW or 37% is hydro power. The diversification of resources is predicted to reach an even mix by the mid 1980's. In agreement with the New York Power Pool members, the system is obligated to maintain a reserve capacity of 18% on a yearly basis. The 1975 production of energy amounted to 30,319 MWHrs of electricity and over 90 million cubic feet of natural gas, with a total of \$972,206,000 in revenues. The Dunkirk station on Lake Erie, which is coal fired was completed in 1960 with a total capacity of 640 MW. The Huntley Station located on the Niagara River in Buffalo is also coal fired, with a 830 MW capability. When Huntley went into service in 1917 with 60 MW it was considered to be the most efficient coal fired unit in the world. Lake Erie 1 and 2 are presently in the siting stage.

The two coal fired units, located close to Dunkirk will each have an 850 MW capability. They are planned for completion in 1985 and 1987. Oswego 1 to 6 located on Lake Ontario are oil fired. Presently they have 1,225 MW capability, however when unit 6 goes into service in 1979, it will have over 2,000 MW capability making it the largest plant in Niagara Mohawk's system. Nine Mile Point 1, on Lake Ontario is a nuclear boiling water reactor unit with 610 MW capability. It went into service in 1969. Adjacent to the plant is an Energy Information Center, which houses a 50 seat auditorium for lectures and an animated 21 meter model of the nuclear plant, and other exhibits. To date, approximately 300,000 visitors from all parts of the world have learned about the development of electricity and safe electrical production from the peaceful atom. Fitzpatrick nuclear station is owned by the New York Power Authority but is operated by Niagara Mohawk. It is also a boiling water reactor unit with a capability of 840 MW and went into operation in 1974. Nine Mile Point 2 is a second boiling water reactor presently under construction and is planned to go into operation in 1982, at 1,100 MW capacity. Albany Steam Station, located on the Hudson River just south of Albany was completed in 1954 and converted from coal to oil in 1970 with 400 MW capability. Adjacent to the station is a four unit gas turbine used for peaking power, with 178 MW capability. Rotterdam is a second gas turbine with eight units totaling 168 MW of peaking capability. Roseton on the Hudson River in Central Hudson's Gas and Electric territory has 1,165 MW capability. The oil fired unit is shared by Consolidated Edison, Central Hudson and Niagara Mohawk, who owns 465 MW. Niagara Mohawk's hydro stations presently in operation are mainly located in the Adirondack forest preserve and state park area in upper New York State. The 79 hydro-

stations presently have a total of 719 MW capability.

4.3 Transmission System

Niagara Mohawk's overhead transmission system total 7,338 km of lines. There are 5,830 km of 115 kV lines; 852 km of 230 kV lines; 543 km of 345 kV lines; and 155 km of 765 kV lines, presently energized at 345 kV. The underground transmission system consists of 32 km of 115 kV cables and 120 km of 230 kV cables. The transmission system utilizes wood, lattice steel and in environmentally sensitive populated areas, tubular steel structures. Wood structures are the most economical. Tubular steel structures have been used since the early 1960's. In 1970 the world's first 765 kV tubular steel pole line was installed on Niagara Mohawk's system. Tubular steel low profile 115/13.2 kV distribution stations are standardized. They are landscaped to comply with the environment. In populated areas stations are placed inside of buildings with the high voltage being overhead and low voltage underground. Large cities, such as Buffalo, are served by a 230/23 kV underground fed station constructed on an entire city block 100 x 120 m in size. The station is enclosed by a 6 m high brick and precast concrete wall to blend with neighboring buildings. Only the 25 m tall lightning masts are visible above the wall. The 230 kV section is constructed on tubular steel stands. The station, like all stations on the Niagara Mohawk system is supervisory controlled and monitored, and inspected periodically by traveling operators.

4.4 Distribution System

The overhead distribution system consists of over 6,200 km of lines below 115 kV and has over 170,000 wire kilometers of distribution feeders. Candlestick configuration underbuilt by telephone and television aerial cables is standard construction.

The underground distribution system consists of over 9,800 km of cables of various voltages. New residential developments of more than 5 homes are generally served by an underground distribution system. The system utilizes enclosed buildings for substations when located within cities. The street lighting system consists of approximately 203,000 luminaires with a combination of incandescent, mercury vapor and high pressure sodium vapor lamps.

4.5 Service System

Approximately 100 service centers of various sizes are strategically located throughout the system. From these the operating and construction crews perform their daily activities. Assisting the crews is a transportation fleet totaling 4,488 vehicles. These consist of 792 personal cars for field supervision; 1,608 miscellaneous size trucks; 377 aerial buckets; 236 various construction equipment; and 796 trailers. The aerial bucket truck is the most important and valuable equipment unit.

4.6 Interconnections

Niagara Mohawk's system is fully integrated with all other neighboring utility systems in the State, as well as the utilities in Canada, Pennsylvania, Vermont and Massachusetts.

5.0 NEW YORK POWER POOL

5.1 Objectives

The New York Power Pool (NYPP) is a contractual association established in July 1966 by seven major investor owned utilities. In 1967 the Power Authority of the State of New York became a participating member of the Pool. Presently the Pool's member systems supply 99% of the electric energy consumed in New York State, by over 18 million people.

The purpose of the Pool is to assist its members to meet their basic responsibilities - to provide for the present and future

electric power needs of the people living in New York State, in the most reliable, economic and environmentally compatible manner possible, without discrimination and at a reasonable cost to the consumers.

5.2 New York State - Yugoslavia Comparison

New York State's geographical area is 125,402 km² in comparison to Yugoslavia's 255,737 km², therefore Yugoslavia is almost twice the size of New York State. By population, Yugoslavia with its 21 million people is approximately 16% larger than New York State with its 18 million people.

5.3 Description

All Pool members are connected with transmission lines which allow them to operate as a team. The eight members of the Pool include: Niagara Mohawk Power Corporation; Rochester Gas and Electric Corporation; New York State Electric and Gas Corporation; Central Hudson Gas and Electric Corporation; Orange and Rockland Utilities, Incorporated; Consolidated Edison Company of New York, Incorporated; Long Island Lighting Company; and Power Authority of the State of New York. The Power Authority does not have a defined geographical service area. It has hydro-electric generating facilities at Niagara Falls and at Massena on the St. Lawrence River, a pumped storage plant at Gilboa and the Fitzpatrick nuclear plant on Lake Ontario.

5.4 Power Control Center

To fulfill its initial operational objectives, the Pool installed a modern highly computerized electric power control center to direct the generation and transmission of electric power throughout the State and to coordinate the operation of the NYPP with neighboring power systems. The Power Control Center (PCC) began operation in February 1970. It is located in Guilderland just

west of Albany and contains over 4,100 m² of floor space, including a 25 m square Control Room, 6 m high. The capital expenditure for the Power Control Center exceeded \$4.5 million dollars. The computer system is a duplex IBM 370 system model 155 and is linked to eight satellite computer facilities at the Pool's member system Power Control Centers. Approximately 1200 messages are entered every 3 seconds to the computer. The Control Room is the heart of operations for the Pool. On duty is one of three teams of dispatchers engaged in the Pool's around the clock activities of coordinating the interchange of power. Sophisticated telemetering, computer and telephone equipment provide dispatchers with load levels on the entire statewide generation and transmission network.

5.5 NYPP Organization

The Pool has a permanent staff of 83 employees and is managed by the Executive Director who reports to the Executive Committee. There are five committees which coordinate the Pool's many activities and provide for operations, for increased emphasis of creative planning, including full consideration for environmental values, public relations and energy conservation. Since 1970 the New York State legislature required that the member systems submit comprehensive filings of data and information to justify the environmental capability and public need, before new electric stations and high voltage transmission lines may be constructed. Five volumes are jointly submitted each year by the member system of the Pool.

5.6 Peak Load Growth Rates

The fuel crisis, particularly in petroleum fuels and the associated increase in fuel costs, combined with energy conservations, have changed the long term historical growth rate in peak

demand. The historical growth of 5.8% in the years of 1964 to 1973, was reassessed to 5% for the years 1974 to 1983 in the 1974 forecast and to 4.2% for the same years in the 1975 forecast. The forecast for the following ten years after 1983 has been reduced to 3.6%. The member systems of the Pool must provide generation capacity to meet the annual peak loads and to insure provisions of an adequate reserve which is established as 18% above the individual member systems annual peak demand.

5.7 Generation System

The Pool's 1975 generation capability reached over 28,000 MW installed capacity. Oil fired units amount to 44%; gas turbines and diesel units 17%; coal fired units 12%; nuclear units 8%; hydro 15%; and pumped storage 4%. Planned additions thru 1990 will change the mix as follows: oil usage will be reduced to 32%; coal generation will increase to 17%; nuclear will increase to 37%; and hydro generation will amount to 14%. Total added capacity is expected to reach 48,000 MW. The total power consumption in the State can be broken down to 71.2% for commercial-industrial-transportation; and 28.2% for residential, of which 21% is for appliance usage.

5.8 Transmission System

The Pool's transmission system in 1975 had a total of 13,382 km of overhead lines. These are divided into 9,086 km of 115 kV and 138 kV lines; 1,627 km of 230 kV lines; 2,506 km of 345 kV lines; 9 km of 500 kV lines; and 154 km of 765 kV construction, presently energized at 345 kV.

The underground transmission system presently has a total of 804 km; of which there are 536 km of 115 kV cables; 20 km of 230 kV cables; and 248 km of 345 kV cables. To keep pace with generation additions, additional 345 kV and 765 kV transmission lines are

required to connect new generation.

5.9 NYPP Integration

Not only are the member systems connected and integrated within the Pool, but they are also connected and integrated with other neighboring systems. To the west with Ontario Hydro, to the east with New England Power Exchange (NEPEX), to the south with the Pennsylvania-Jersey-Maryland (PJM) System. All these systems are synchronized, therefore flow of power may be exchanged at any instant.

6.0 NORTH-EAST POWER COORDINATING COUNCIL

6.1 Description

The Northeast Power Coordinating Council was organized in January 1966, by agreement between the New York, New England and Ontario Hydro Utility Systems. New Brunswick recently joined NPCC. It was a direct result of the November 9, 1965 blackout which plunged 30 million people into darkness. Five key transmission lines tripped in less than 3 seconds, when a relay failed in an Ontario Hydro switchyard, causing a large surge of power in other parts of the Northeast.

The NPCC is the first such organization in North America. Today the 21 member systems supply 98% of the electric power requirements in New Brunswick and Ontario in Canada; and in New England and New York in the United States. The organization and objectives of NPCC are similar as previously described for the New York Power Pool. Each of four member systems are coordinating their interconnected individual power control centers. The NPCC system by load capacity is the largest of the nine regional councils in North America. Within the four member systems of NPCC, the New York Power Pool is the largest in terms of electric loads

and contains the most concentrated markets for energy in the country.

6.2 Generation System

The generation capability by the end of 1975 reached a total of 66,119 MW installed capacity. Fossil generation amounted 55%; gas turbines and diesel generation 11%; nuclear 12%; hydro 18%; and pumped storage 4%.

6.3 Transmission System

The total length of transmission lines presently amounts to 45,521 km. Of these there are 26,674 km 115 and 138 kV lines; 12,619 km of 230 kV lines; 5,028 km of 345 kV lines; 1,046 km of 500 kV lines; and 154 km of 765 kV construction, energized at 345 kV presently.

6.4 Transfer Capability

The Northeast Power Coordinating Council, as one of the nine regional councils in North America, is linked to other regional systems. An approximate interregional transfer capability to NPCC amounts to 5,600 MW, while transfer from NPCC amounts to 3,100 MW. Connections include Manitoba Hydro, Hydro Quebec and Nova Scotia in Canada; the Michigan Power Pool and Pennsylvania-Jersey-Maryland System in the States.

7.0 NATIONAL ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL

7.1 Objectives

The National Electric Reliability Council (NERC), coordinates nine regional councils in the development of standards and criteria applicable to the North American Continent. It was formed voluntarily by the electric utility industry in 1968, and directs its efforts to augment the reliability and adequacy of bulk power supply of the electric utility systems.

7.2. Description

NERC membership comprises essentially all of the electric power systems in the United States and the Canadian systems in the provinces of New Brunswick, Nova Scotia, Ontario, Manitoba and British Columbia. The nine regional members of NERC are: Western Systems Coordinating Council (WSCC); Mid-Continent Area Reliability Coordination Agreement (MARCA); Southwest Power Pool (SPP); Electric Reliability Council of Texas (ERCOT); Mid American Interpool System (MAIN); East Central Area Reliability Coordination Agreement (ECAR); Southeastern Electric Reliability Council (SERC); Northeast Power Coordinating Council (NPCC); and Mid Atlantic Area Council (MAAC).

7.3 Generation System

NERC's generation capability at the end of 1975 had a total of 477 GW's. It is projected that by 1984, the capability will reach 819 GW. The actual capability consists of 38% coal fired units; 19% of oil fired units; 21% gas turbines and diesel units; 8% of nuclear units; 12% hydro; and 2% pumped storage.

7.4 Transmission System

NERC's overhead transmission system at the end of 1975 had a total of 695,800 km of transmission lines. By voltage there are 220,000 km of 69 kV lines; 154,000 km of 115 kV lines; 102,000 km of 138 kV lines; 39,000 km of 161 kV lines; 91,000 km of 230 kV lines; 65,000 km of 345 kV lines; 23,000 km of 500 kV lines; and 2,000 km of 765 kV lines. The underground transmission system had a total of 4,412 km, of which there are 1,418 km of 69 kV cables; 806 km of 115 kV cables; 1,805 km of 131 kV cables; 24 km of 161 kV cables; 196 km of 230 kV cables; and 163 km of 345 kV cables.

7.5 EHV-System

The extra high voltage system development follows a regional pattern. On the West Coast, bulk transmission is transferred with 345 kV, 500 kV and 800 kV DC lines; the Central region uses 345 kV lines; the East-central and Northeast region uses 765 kV; while the Central Atlantic and South Atlantic region uses 500 kV lines.

7.6 USA's Utility System

Today, the entire electric utility industry in the United States of America has a total of 3,400 companies in operation. Investor owned companies number about 500. Almost 2,000 of the remainder are municipals, subdivided about evenly into generating and nongenerating companies. The remaining 1,000 comprise cooperatives, public power districts, and state and federal organizations.

The 500 investor owned companies, with the exception of a few large federal and state authorities are much larger in terms of capacity, than are their public counterparts. About 75% of installed capacity is investor owned.

All these NERC regional member systems produced by the end of 1975, a total of 1,998,000 GWhrs of electric energy.

7.7 Integrated System

Today, the entire country and the major part of Canada is integrated with transmission lines. From the Pacific to the Atlantic and from the populated areas of Canada to the Gulf of Mexico there is a system capable of transferring electric energy whenever or wherever it is needed. By the end of 1950, the public demand to build more pleasing lines, compatible with the environment resulted in newer designs and configurations. Tubular steel structures are being combined with steel and aluminum lattice

structures depending on needs, optimization and transportation requirements.

8.0 TRIBUTE TO TESLA

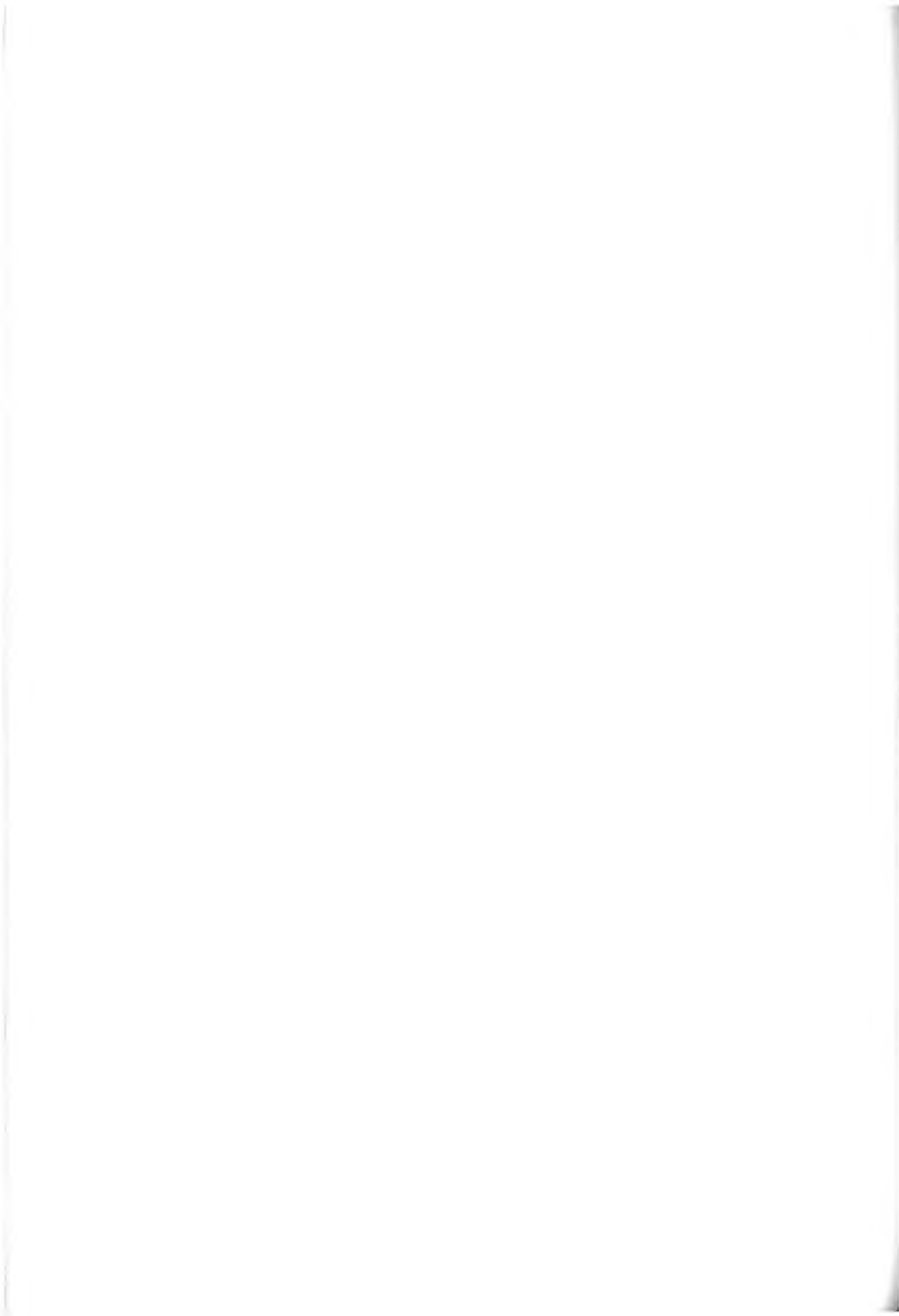
When Tesla came to the United States he had a dream to harness Niagara Falls. This dream came true with his discovery of the Polyphase AC System and the foresight of the pioneers of Niagara Falls Power Company to utilize it at Adams station. What Tesla did not know is that the polyphase system would one day spread throughout the world. It started with an 11 kV transmission line and has progressed to the present 765 kV transmission lines. However the developments which are based on his theory do not stop here. Scientists and engineers have plans under test for voltages of 1,100 kV to 1,500 kV. The voltage increased 100 times in 80 years since the first significant application of Tesla's system. And so today on the 120 anniversary of his birth, we pay tribute to him and his discovery of the Polyphase AC System which made him the Giant of the Electric industry.

REFERENCES

- (A) Buck, H. W., Niagara Falls Power, Cassier's Magazine, New York, 1901
- (B) Adams, E.D., Niagara Power, Volume I & II, History of the Niagara Falls Power Company, Private Printing, 1927
- (C) Denison, M., Niagara's Pioneers, Private Printing, 1953
- (D) Swezey, K.M., Nikola Tesla, Science, Vol. 127, Number 3307, May, 1958
- (E) Frank, M.V., Utility Structures and the Environment, New York State Professional Engineers Society, Syracuse, April 4, 1970
- (F) Frank, M.V., First Tubular Steel 765 kV Transmission Line, Part 1&2, Swiss Engineers & Architects Society, Baden, Switzerland, March 1971
- (G) Electrical World, The Electric Century 1874 - 1974, McGraw Hill, N.Y., June 1974
- (H) History Dept., Niagara Mohawk, The Story of Niagara Mohawk, Syracuse, 1975
- (I) Niagara Mohawk Statistical Yearbook 1950 - 1975
- (J) New York Power Pool, Miscellaneous Reports and Presentations, Guilderland, 1972-75
- (K) New York Power Pool, Report of Member Electric Systems, Vol. 2, 1976
- (L) Northeast Power Coordinating Council, Data on Coordinated Regional Bulk Power Supply Programs, April 1976
- (M) National Electric Reliability Council, Review of Overall Reliability and Adequacy of the North American Bulk Power Systems, July 1975

VIII. Poglavlje

KONVERZIJA ENERGIJE



Jovan Andrić
Tuzla, Irčeva 25

ELEKTRIČNE MIKRO CENTRALE

Današnje stanje u energetici upućuje na traženje novih energetskih izvora. Ovo je posebno važno sa stanovišta očuvanja čistoće prirode i težnje da se ne izgube energetski izvori jer su neki stari već na izmaku. Važna je ona energetska konverzija koja koristi prirodne energetske količine na najracionalniji način. Pažnju zaslužuju mali izvori električne energije ako su ekonomični, dugotrajni i ne zahtevaju nikakvu poslugu. Takve su se pokazale sunčane baterije kao najugodnije za direktnu konverziju sunčeve energije u električnu. Međutim, pitanje je koje paralelne izvore uzeti da bi se popunila praznina nastala u vreme prirodnog pasiviteta ove konverzije.

POWER MICRO-STATIONS

The present-day energy situation calls for the provision of new power sources. This is particularly important if environmental considerations, and the wish to avoid the possible loss of power sources as some of them are close to depletion, are taken into account. Energy conversion which uses natural energy in the most rational way is of the highest importance. Due attention should be paid to small power sources if they prove to be economical, lasting and require no servicing, e.g., solar batteries which have been found to be most suitable for directly converting solar energy into electric power. The question is, however, which parallel sources to use in order to fill the gap caused by the naturally passive period in such conversion.

Postoje još uvek prilične teškoće u snabdevanju električnom energijom manjih potrošača kao što su usamljeni kampovi, raštrkane seoske kuće, planinarski domovi i slično. Veliki elektroenergetski sistemi kao osnovni snabdevači električnom energijom, ma kako bili usavršeni, ne pružaju povoljne uslove za ove potrošače i prema njima se unekoliko maćehinski odnose. Očito je da potražnju za energijom ne zadovoljavaju ostvareni energetske izvori ni kod velikih potrošača, pa je sitan potrošač u vrlo nepovoljnom položaju. Manje razvijene zemlje su ovom situacijom posebno pogođene. I današnji, mada vrlo visok, stepen razvoja nauke i tehnike neopravdano je zanemario ovo područje rada.

Jasno je da se ovde radi o malim izvorima električne energije koji moraju zadovoljiti pet osnovnih uslova :

- da su solidnog tehničkog rešenja i da besprekorno funkcionišu,
- da su jednostavni za prenos i montažu,
- da ne zahtevaju posebno opsluživanje,
- da imaju zagarantovanu trajnost rada i
- da su ekonomski opravdani.

Potrošačima treba omogućiti da, kao što kupuju električnu peć, frižider, televizor i slično, mogu nabaviti i malu električnu centralu za potrebe svoga domaćinstva i to pod uslovima da im je ona u datoj situaciji jeftinija od priključenja na elektroenergetski sistem. Pri ovome je od velike važnosti činjenica da postoji direktna veza između korišćenja potrošne energije i zagađivanja naše sredine. Zato rešenje ovih energetske izvora treba da predstavlja znatan doprinos očuvanju čistoće prirode. Takođe je vežno da su naše kupovne navike usmerene ka energetske izvorima, koji su u ovom pogledu racionalnije sagrađeni. U ove svrhe je najugodnije koristiti raspoložive prirodne energetske izvore kao što su :

- sunčeva energija,
- energija vetra,
- geotermička energija,
- energija morskih valova,
- neki oblici hemijske energije itd.

Pražnju stručnjaka najviše su privukle direktne konverzije sunčeve energije u električnu pomoću tzv. sunčanih baterija. Sunčane baterije su zbog ugodnog radnog principa, pri kome nema nikakvih

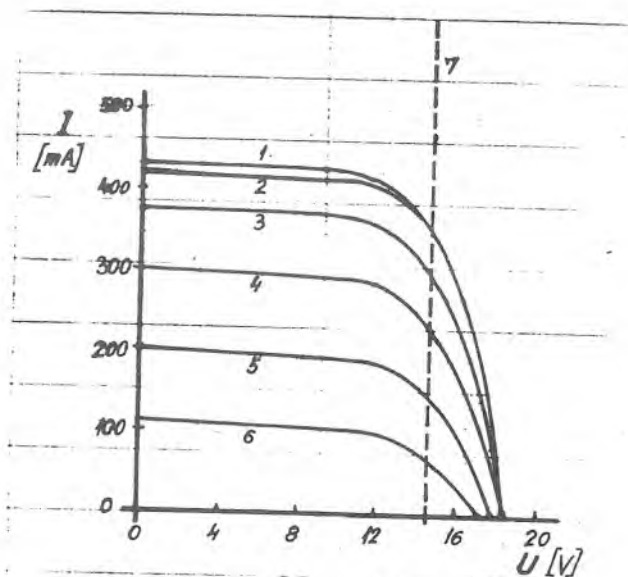
mehaničkih pokreta niti šumova, kao i zbog dobrih radnih uslova, pri kojima je zagarantovana trajnost rada bez ikakve posluge, stekle epitet "moderne" i predstavljaju predmet širih interesovanja. Ovi energetske izvori su se toliko razvili da već imaju široko područje primene. Njihova snaga se kreće od nekoliko vata do nekoliko kilovata sa jakom tendencijom daljeg rasta. Zapaženije sunčane baterije su konstruisane za napajanje svemirskih brodova električnom energijom. Medjutim, u Americi su konstruisane sunčane baterije za napajanje domaćinstava električnom energijom. Firma SES (SOLAR ENERGY SYSTEMS), Newark, Delaware (SAD) već je u svoj proizvodni program uvrstila proizvodnju elemenata sunčanih baterija (TYPICAL 12 V ARRAY). Napon ovih baterija je skoro konstantan i kvalitetan. Dobra je prilagodjenost elektroenergetskim potrošačima, a konverzija toplotne energije sunca u električnu teče neprekidno i nije potrebna posluha. Ugrađena je blokadna dioda za sprečavanje pražnjenja povratnom strujom pri paralelnom radu sa akumulatorskom baterijom, a obezbeđena je i zaštitna dioda koja štiti od preopterećenja. Inače, napon baterije se menja sa temperaturom. Porast temperature baterije iznosi približno 7°C iznad temperature vazduha, kada je direktno na suncu. Medjutim, ako je cirkulacija vazduha blokirana, onda temperatura može porasti znatno više. Treba paziti da se izbegne izloženost sunčevoj toploti preko 75°C do 85°C kako bi se izbegla permanentna redukcija izlazne snage baterije.

Firma SES izvodi instalacije domaćinstava sa tzv. panelima (TYPICAL PANEL) koji su kombinovani u sunčane baterije smeštene na krovu kuće. Dimenzije jednog panela su 48,26 cm x 53,34 cm, težina 4,5 kg, težina za transport 8,1 kg, nominalni napon 12 V, struja 400 mA, maksimalna snaga 5,2 W. Maksimalna snaga je pri naponu nešto iznad 12 V da bi se ostvario dovoljan potencijal za napajanje akumulatorske baterije.

Sunčana baterija se formira od panela prema zahtevima instalacije domaćinstva i obično se koristi za kompletno napajanje i za grejanje instalacije tekuće vode.

Poznati stručnjak Dr. Ing. Karl Böer, direktor pomenute firme SES, prvi je postigao zadovoljavajuće rezultate u ovim instalacijama. Cena kuće sa sunčanim baterijama je samo za 10% viša od klasične

gradnje. Na slikama 1 i 2 date su karakteristike tipskih elemenata za sunčane baterije.



Slika 1.

U-I karakteristika tipskih 12 V elemenata sunčane baterije koje proizvodi firma SES (TYPICAL 12 V ARRAY) . Promene u izlaznoj snazi kao funkciji orijentacije prema određenoj poziciji sunca(sunčano podne).

1.- sunčano podne-osunčavanje kod $90 \text{ W/o}, 093 \text{ m}^2, 27^\circ\text{C}$.

2.- jedan sat pre ili posle podne,

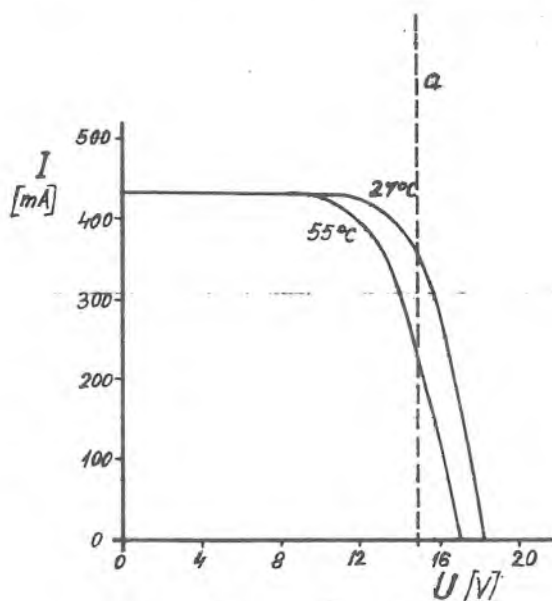
3.- dva sata pre ili posle podne,

4.- tri sata pre ili posle podne,

5.- četiri sata pre ili posle podne,

6.- pet sati pre ili posle podne i

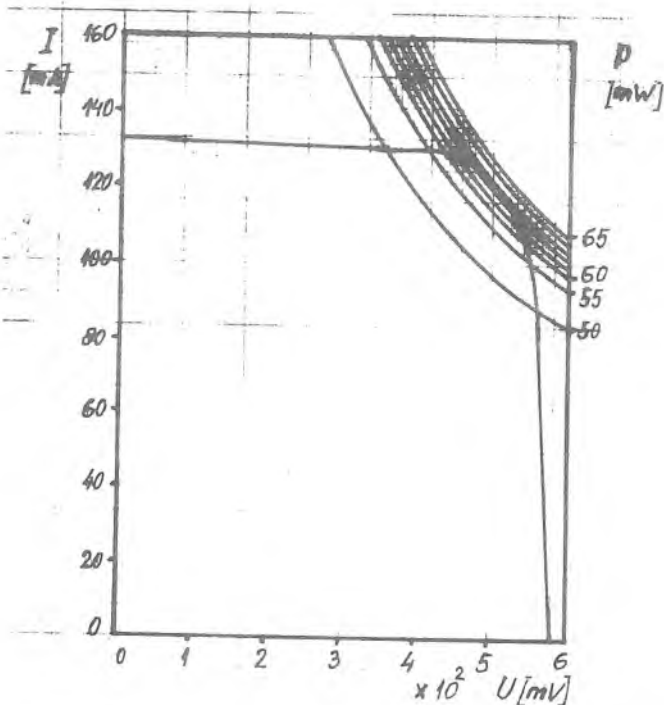
7.- diodna zaštita.



Slika 2.

U-I karakteristika tipskih 12 V elemenata sunčane baterije koje proizvodi firma SES(TYPICAL 12 V ARRAY).Promene u izlaznoj snazi kod temperatura 27°C i 55°C .
a- diodna zaštita.

Poznata nemačka firma SIEMENS već duže vreme ima u svom proizvodnom programu elemente za sunčane baterije.Ova firma navodi i detaljnije podatke o ovim proizvodima.To su silikonski elementi tipa BPY 73 i BPY 74, malih su dimenzija(20mm x 20mm) i male težine.Očito je da i firma SIEMENS ima usavršenu tehnologiju proizvodnje elemenata sunčanih baterija i da ih,u prome- njenoj proizvodnoj verziji,može uspešno primeniti u svrhe napa- janja domaćinstava električnom energijom.Inače,pomenuti eleme- nti su namenjeni za napajanje nekih prenosnih električnih apa- rata(prenosni radio-prijemnici i sl.).U tabeli br.1 dati su



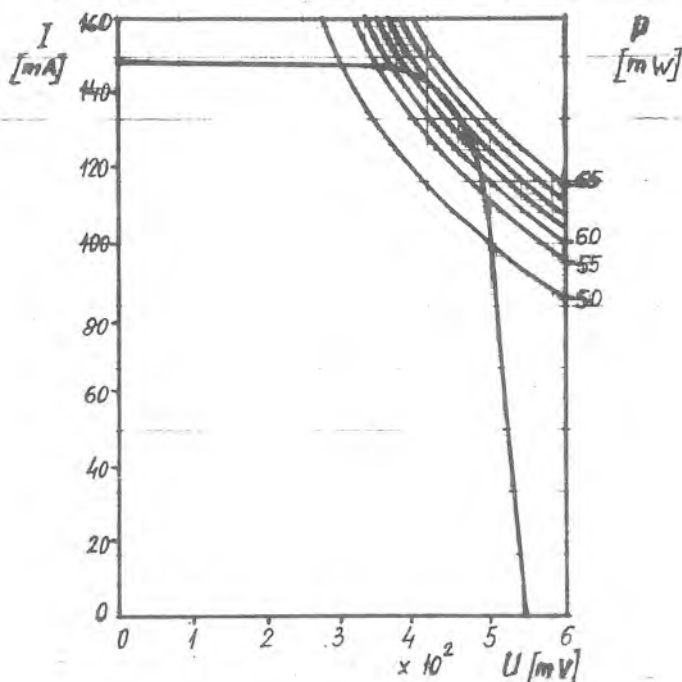
Slika 3.

U-I karakteristika
sunčanog elementa
proizvodnje firme
SIEMENS, tipa BPY 73.

T A B E L A 1

Osnovni parametri elementa	SIEMENS, tip	
	BPY 73	BPY 74
Temperaturne radne granice	-40 do 80°C	-80 do 215°C
Napon	≥ 535 mV	≥ 585 mV
Struja	≥ 137 mA	≥ 130 mA
Valna dužina energetskog kvanta	aprox. 0,7 μm	aprox. 0,7 μm
Korisna svetlosna površina	3,72 ± 0,04 cm ²	3,72 ± 0,04 cm ²
Optimalna proizv.snaga	≥ 57,5 mW	≥ 61 mW
Degradacija snage kod radijacije 10 ¹⁵ e/cm ²	25 %	26 %
Specifični otpor	10 ± 3 Ohm·cm	1 ± 0,3 Ohm·cm
Temper.koeficijent(naponski)	- 2,2 mV/°K	- 2,15 mV/°K
Temper.koeficijent (strujni)	+ 0,07 mA/°K	+ 0,046 mA/°K

njihovi osnovni tehnički podaci, dok su na slikama 3 i 4 date njihove karakteristike.



Slika 4.

U-I karakteristika sunčanog elementa proizvodnje firme SIEMENS, tipa BPY 74.

Posebno je važno pitanje osvetljenosti sunčanih baterija. Intenzitet sunčevog zračenja, koje prodire do željenog prostora na zemlji, najvažniji je faktor pri odluci o instaliranju ovih baterija. Ovaj intenzitet zavisi od više elemenata: vremena, dana, godine, geografske širine mesta, otvora kroz koga svetlost prodire u prostor, kvalitativnih i kvantitativnih osobina zaštitne pregrade (stakla i sl.) kroz koju svetlost prolazi na svom putu do elementa itd. Sa smanjenjem visine sunca, smanjuje se intenzitet njegovog zračenja. Prema navodima L.L. Daškevića, energija spektra zračenja, pri promeni visine sunca, kreće se u sledećim granicama: visina sunca 40° daje zračenje cca 1% ultravioletnih zraka valne dužine 290 - 310 nm; 40% zračenja vidljivog spektra valne

dužine 390 - 760 nm i 59 % infracrvenih zraka valne dužine 760--2300 nm. Sa povećanjem visine sunca, sadržaj kratkotalasnih zraka se smanjuje, a drugih talasa se povećava. Kako se vidi, javlja se godišnje kolebanje sunčevog zračenja u donjem delu spektra pri čemu je najšira oblast isijavanja u jesen. Vremenske prilike takođe utiču na karakter sunčevog zračenja. Pri prosečno tmurnom nebu, intezitet zračenja u ultravioletnom delu spektra se smanji na 50 % ; u vidnom delu na 64 % i u infracrvenom delu na 77 %. Sve ovo treba imati u vidu pri izboru mesta za postavljanje sunčevih baterija. S obzirom da su elementi baterija s aktivne strane zaštićeni staklom, potrebno je poznavati karakteristike ove zaštite. Obično staklo propušta zrake dužine vala 305 nm i više sa 90 % njihove prolaznosti. Što je manja dužina vala svetlosti, to je niži procenat njene prolaznosti kroz obično staklo. Ukoliko se koristi neko drugo staklo, treba uzeti u obzir povećanje gubitaka svetlosti. Prema statističkim podacima naših meteoroloških službi, dati su

T A B E L A 2

Verovatnoća aktivnog sunčevog dejstva u toku godine za kontinentalni deo Jugoslavije izuzev primorja i mesta sa nadmorskom visinom većom od 1000 m.

meseci	procenti (%)	meseci	procenti (%)
januar	15 - 19	juli	69 - 72
februar	28 - 31	avgust	71 - 73
mart	35 - 39	septembar	58 - 62
april	48 - 52	oktobar	40 - 43
maj	63 - 67	novembar	18 - 22
juni	60 - 63	decembar	14 - 18

u tabeli 2 podaci verovatnoće aktivnog dejstva sunca u toku godine i to za kontinentalni deo Jugoslavije. U ovoj tabeli nisu uzeta u obzir mesta sa nadmorskom visinom većom od 1000 m. Može se očekivati da primorska mesta imaju veći procenat aktivnog sunčevog dejstva od datih vrednosti u tabeli 2.

Poznato je da sunčana (solarna) konstanta iznosi $1,946 \text{ kal/cm}^2 \cdot \text{min}$. To je srednja vrednost inteziteta sunčevog zračenja na granici atmosfere i predstavlja količinu energije koja pada u jedinici vremena na jedinicu površine, normalnu na sunčeve zrake, i to pri srednjem rastojanju zemlje od sunca. Razumljivo je da je intezitet ovog zračenja, zbog prolaska kroz atmosferu, oslabljen. U tabeli 3 date su vrednosti direktnog sunčevog zračenja u toku 24 sata, u $\text{kal/m}^2 \cdot \text{h}$ i to za područja 40, 50 i 60 stepeni geografske širine.

Da bi sunčane baterije dobro funkcionisale, moramo provesti dobru osvetljenost istih. Zato moramo raspolagati podacima sunčevog inteziteta, odnosno položaja sunca na nebeskom svodu. Položaj sunca na nebeskom svodu zavisi od tri faktora: geografske širine mesta, datuma i sata u toku dana. Za ovo odredjivanje postoje dobro razradjene metode i to ne prestavlja poseban problem.

Medjutim, postoji, prema tabeli 2 i 3, vreme kada je sunčevo dejstvo nedovoljno za zahtevane minimalne energetske konverzije pa je sunčana baterija skoro bez električne energije. Nekada je to znatan vremenski period, tako da paralelno vezana akumulatorska baterija, koja se brine o odredjenom energetskom kontinuitetu, nije u stanju da obezbedi snabdevanje potrošača. Očito je da treba obezbediti još jedan mali izvor električne energije koji bi radio paralelno sa sunčanom baterijom. Analiza drugih, raspoloživih, prirodnih energetskih izvora upućuje na električne centrale na vetar (vetrenjače). Sunčana baterija i vetrenjača mogu u paralelnom radu da obezbede priličan energetski kontinuitet jer kada je slabo dejstvo sunca tada se javlja zapaženiji intezitet vetra i obratno. Ovo je posebno izraženo u kontinentalnom delu naše zemlje, dok bi u primorskim krajevima bio dovoljan rad same sunčane baterije.

Inače, vetrenjače se vrlo uspešno izvode za male snage (prosečno 2 kW) i u nekim zemljama ih ima na desetine hiljada. Tehnika

T A B E L A 3

Srednja vrednost inteziteta direktnog sunčevog zračenja u toku
24 sata u $\text{kal/m}^2 \cdot \text{h}$

(prema A. J. Štainbergu)

datum	geograf. širina	v r e m e (sati)								
		12	11	10	9	8	7	6	5	ostalo
			13	14	15	16	17	18	19	
6. januar i 7. decembar	40	720	685	640	550	320	-	-	-	-
	50	640	635	580	400	-	-	-	-	-
	60	450	390	215	-	-	-	-	-	-
5. februar i 7. novembar	40	760	750	700	615	470	-	-	-	-
	50	700	695	640	605	275	-	-	-	-
	60	670	645	550	365	-	-	-	-	-
7. mart i 7. oktobar	40	795	780	745	685	560	325	-	-	-
	50	770	765	725	670	525	270	-	-	-
	60	745	735	705	660	485	-	-	-	-
7. april i 7. septembar	40	810	805	780	745	655	525	170	-	-
	50	805	800	770	730	670	535	245	-	-
	60	795	785	765	740	680	575	285	-	-
7. maj i 7. avgust	40	810	805	780	745	685	555	355	-	-
	50	810	805	795	760	700	615	520	-	-
	60	825	820	800	760	725	660	560	345	-
7. juni i 7. juli	40	800	795	780	745	685	590	445	-	-
	50	800	785	780	750	710	640	530	310	-
	60	805	800	795	775	740	680	610	510	305 -

njihove gradnje je dosta usavršena, i s obzirom da se uspešno primenjuju za manja domaćinstva, potpuno bi odgovarale pomenutoj nameni.

LITERATURA

1. SES, Incorporated, NEWARK, DELAWARE 1971 1, 302 731-0990.
2. SIEMENS Data Book 1973/74, OPTOELECTRONICS SEMICONDUCTORS München 80, Balanstr. 73.
3. Šteinberg A.J. Rasčet insoljaciji zdaniy, izd. Budivelnik, Kiev - 1975.

ZAHVALA

Zahvaljujem se Američkoj firmi SES(SOLAR ENERGY SYSTEMS) i direktoru Dr. Ing. Karlu Böeru za iscrpne informacije u vezi sa proizvodnjom elemenata sunčanih baterija.

Takodje se zahvaljujem Nemačkoj firmi SIEMENS za iscrpne informacije u vezi sa njihovom proizvodnjom pomenutih elemenata.

Docent, mr Abdurahman Grapci
Tehnički fakultet
Univerzitet u Prištini

PERSPEKTIVA OLOVNIH AKUMULATORA KAO IZVORA ENERGIJE

Perspektiva olovnih akumulatora može se razmatrati s nekoliko gledišta i to: primjene u industriji (automatika i signalizacija), saobraćaju (vozila s unutrašnjim sagorevanjem, vozila sa akumulatorskim pogonom i brodovi). Imajući u vidu zagađivanje okoline od motornih vozila sa unutrašnjim sagorevanjem, pošlo se na iznalaženje vozila koja neće zagađivati vazduh. Danas u svetu laboratorijski i eksperimentalno su iznalaženi prototipovi pojedinih vozila sa akumulatorskim pogonom. Ta vozila u nekim zemljama (Japan, SAD, SRN, Austrija, Francuska i dr.) su u primeni, ali ne i masovno. Danas u našoj zemlji završeno je eksperimentalno dostavno vozilo za hleb. Izvršene su prve probne vožnje u neposrednoj okolini radionice. Razrađeni su okviri projekta "putničko vozilo na električni pogon".

LEAD ACCUMULATORS - PROSPECTIVE POWER SUPPLY

The prospects of lead accumulator batteries can be considered from the standpoint of their application in industry (control and signalling) and transportation (internal combustion engines, accumulator driven vehicles, and ships). Bearing in mind environmental pollution caused by internal combustion vehicles attempts are being made at developing a nonpolluting vehicle. Battery driven vehicle prototypes have been developed on a laboratory and experimental scale. Such vehicles are already used in some countries (Japan, USA, West Germany, Austria, France, etc.), although not on a large scale.

In Yugoslavia, an experimental bread delivery vehicle has been designed, and the first plant test runs made. Preliminary work on a project involving an electrically driven passenger car has also started.

Perspektiva olovnih akumulatora kao izvora energije za napajanje postrojenja i uređaja u industriji i saobraćaju

Razvoj proizvodnje motornih vozila u svetu za poslednjih 20 godina povećan je za preko 4 puta. Danas se u svetu proizvodi oko 600.000 tona olovnih akumulatora, a Jugoslavija u ukupnoj svetskoj proizvodnji olova učestvuje sa oko 2,6%, dok je njeno učešće u potrošnji u pola manje i iznosi samo 1,3%.

Potrošnja olova u proizvodnji akumulatora beleži visoku stopu rasta i to: SR Nemačka 5,3%, Francuska 3,4%, V.Britanija 4,1%, SAD 4,5%, Italija 9,1% i Japan 11% ili prosečno u ovim industrijski razvijenim zemljama svega 5,2%. Potrošnja starterskih akumulatora je ograničena pretežno na automobile s unutrašnjim sagorevanjem, dok industrijski akumulatori pretežno na: proizvođače i korisnike elektrokolica, viljuškara, jamskih lokomotiva, liftova; PTT; železnice; hidro i termo elektrane; savremena urbanizacija i akumulatorska vozila.

Japanski predstavnici S.Sahaski i dr.S.Hatori-a iz "Jasa Baneri co" na konferenciji za olovo u Parizu su izjavili da su u Japanu još od 1972.godine u upotrebi autobusi na akumulatorski pogon koji i danas saobraćaju i da su neki prešli par stotina hiljada kilometara. Građski saobraćaj je pogodan za akumulatorski pogon zbog konstantne dnevne kilometraže i zbog čovekove sredine u izgrađenim naseljima i naseljenim područjima. Autobusi na akumulatorski pogon odlikuju se po slabim šumovima kao i po tome što u pogonu nema dima ni mirisa. Osim toga, rukovanje s njima je vrlo jednostavno, tako da često opsluživanje može da vrši i osoblje koje za ovaj pogon nije obučeno. Oni su odmah spremni za pogon i ne iziskuju nikakav postupak za puštanje u rad. Troškovi energije su niski, a naročito ako se puni jeftinom noćnom strujom. Habanje elektrovozila je znatno manje nego drugih vozila, te im je zato vek naročito dug. Međutim, što se troškova tiče, autobusi na akumulatorski pogon su skuplji od konvencionalnih autobusa (oko 10%). Vozači ističu da ovi autobusi imaju bolje ubrzanje i da štede energiju jer su snabdeveni specijalnim motorima jednosmerne struje. Iako su uloženi znatni naponi da se smanji težina autobusa na akumulatorski pogon, ipak to nisu postigli

jer su danas autobusi na akumulatorski pogon teži od autobusa sa dizel pogonom za 7-10 tona, i to uglavnom zbog akumulatora koji predstavlja 1/3 težine. Svi akumulatori koji se za ovo koriste u Japanu su olovni, kako bi se dobio visok učinak po jedinici zapremine. Ni-Cd nisu bolji, a natrijum sumporni nisu još uvek komercijalno sposobni.

Akumulatori, njihovo ponašanje i mogućnosti primene, razvijali su se zahvaljujući stalnoj vezi prakse, teorije i eksperimentalnog istraživanja. Eksperimentalno istraživanje razvijalo se paralelno s teorijom, te je često eksperimentom potvrđeno teoretsko rešenje ili obratno, da je eksperimentalno rešenje dobilo teoretsko objašnjenje.

Prva eksperimentalna ispitivanja odnosila su se na ispitivanje elektrohemijskih karakteristika akumulatora uz razna opterećenja pod raznim uslovima rada.

Napretkom tehnologije i razvitka novih metoda merenja eksperimentalna istraživanja i ispitivanja elektrohemijskih karakteristika akumulatora dobivaju zamah tek unazad desetak godina, tj. izradom programa razvoja industrije drumskih vozila i motora SFRJ koji je izdala Privredna komora 1963.godine. Do te godine, proizvodnja industrijskih baterija nije imala tretman posebne privredne delatnosti - odnosno privrednog ogranka industrije akumulatora, već je praktično tretirana kao sporedna delatnost. Proizvodnja ovih akumulatora imala je više zanatski karakter s ručnom obradom i samo po narudžbini.

Razvoj proizvodnje motornih vozila u svetu za poslednjih 20-tak godina je povećan za preko 5 puta. Danas se u svetu proizvodi oko 600.000 tona olovnih akumulatora. Jugoslavija u ukupnoj svetskoj proizvodnji olova učestvuje sa oko 2,6%, dok je njeno učešće u potrošnji upola manje i iznosi samo 1,3%, što je svakako odraz niskog stepena mehanizacije, naročito unutrašnjeg transporta, primitivnih sredstava signalizacije i nerazvijene mreže telefonije, kao i nedovoljna elektrifikacija industrije. Potrošnja olova u proizvodnji akumulatora beleži visoku stopu rasta i to: u SRN 5,3%, Francuskoj 3,4%, V.Britaniji 4,1%, SAD 4,5%, Italiji 9,1% i Japanu 11% ili prosečno u ovim industrijski razvijenim zemljama svega 5,2%.

Smatramo da je interesantno i nužno izneti dva događaja, koja su se nedavno odigrala, i koja pokazuju koliko će u budućnosti olovni akumulatori biti važni i neophodni.

1. Vrlo interesantna izlaganja japanskih predstavnika S.Sahaski i dr.S.Hatoria iz "Jasa Banery Co" na konferenciji za olovo u Parizu. Naime, oni iznose da su u Japanu još od 1972.godine u upotrebi autobusi na akumulatorski pogon, i da su od 12 autobusa koji i sada saobraćaju, neki od njih prešli više stotina hiljada km. Gradski saobraćaj je pogodan za akumulatorski pogon zbog konstantne dnevne kilometraže i zbog zaštite čovekove sredine u izgrađenim naseljima i naseljenim područjima. Međutim, što se troškova tiče, autobusi na akumulatorski pogon su skuplji nego konvencionalni autobusi. Ali uprkos ovome, neke opštine u Japanu su pokazale interes za ove, ukoliko troškovi autobusa sa akumulatorskim pogonom ne prelaze 150% od troškova autobusa sa dizel motorom. Da bi se postigli povoljniji efekti, autobusi sa akumulatorima su izgrađeni sa lakom aluminijskom karoserijom i pogonskom grupom. Vozači ističu da ovi autobusi imaju bolje ubrzanje nego autobusi sa dizel pogonom i da štede energiju jer su snabdeveni specijalnim motorima jednosmerne struje. Sigurnosni uređaji uključuju detektore za "odvođenje" struje kao i druge anti šok uređaje. Iako su uloženi znatni naponi da se smanji težina, autobusi na akumulatorski pogon su ipak teži od odgovarajućih autobusa sa dizel pogonom za 7-10 tona i to uglavnom zbog akumulatora koji predstavljaju 1/3 težine.

Svi akumulatori, koji se za ovo koriste u Japanu, su olovni kako bi se dobio visok učinak po jedinici zapremine. Ni-Cd nisu bolji a natrijum-sumporni članci nisu još uvek komercijalno sposobni. Akumulatori su specijalno projektovani da proizvode 30 do 50% više nego konvencionalne trakcione ćelije. Oblik takođe omogućuje minimalnu težinu, maksimalnu sigurnost i lako održavanje.

Osaka je prvi grad koji koristi gradske autobuse na akumulatorski pogon, koji već rade od 1972.god. prelazeći prosečno 5 tura od po 24 km/dan.

Akumulatori se zamenjuju pomoću automatskog uređaja nakon svakih 45 km, i ova operacija traje manje od tri minute. Ispražnjeni akumulatori mogu se napuniti za 4-5 časova. U budućnosti

visoki troškovi uopšte i visoki troškovi eksploatacije biće još dalje reducirani, ali je već sada prevaziđeno mišljenje da su autobusi sa pogonom na akumulatore spori i nepraktični. Troškovi eksploatacije će se i dalje smanjivati tako da će biti 10% preko troškova konvencionalnih autobusa.

2. U SR Nemačkoj, 1976.godine stupa na snagu zakon o smanjenju olova u benzinu. Prema ovom zakonu ubuduće će benzin sadržavati umjesto dosadašnjih 0,4 grama olovnog tetretila u litri samo 0,15. Ovo je, međutim, imalo za posledicu niz negodovanja i protivurečnih mišljenja kod proizvođača automobila, jer se dovodi u pitanje opstanak oko 9,000.000 automobila, koliko ih sad ima u SR Nemačkoj. Pored toga i budući potencijalni kupci novih automobila sad se teže odlučuju da nabave kola sa klasičnim motorom, kad znaju da će se on uskoro morati da menja ili rekonstruiše zbog korišćenja običnog umesto super benzina. Sve je ovo ipak drugostepeno u celom tom sukobu jer je prvenstveno pitanje: spasavanje čovekove sredine od opasnog zagađivanja koje prouzrokuje klasični gradski saobraćaj.

U SR Nemačkoj je 1974.godine pušteno u probni rad 20 autobusa na električni pogon na relaciji München-Disseldorf. Ovi autobusi dnevno rade po 16 časova i prešli su preko 300.000 km. Pri tome se pokazalo da je višegodišnji rad razvoja firme "Varta" na napojnim uređajima za elektro autobus uspešan, tj. početne poteškoće u određivanju pojedinih komponenata su prevaziđene. Naravno, teško je bilo da se postigne sposobnost snage i sigurnost pogona koje se tražilo od visokoučinskih akumulatora.

Da bi se optimalno primenile akumulatorske baterije na motornim vozilima, Varta je proizvela tri vrste akumulatora i to:

- L 800 V3 (lake uslove) za golf vozila i gradska vozila ispod 1 tone
- M 750 V3 (srednje uslove) za veća vozila kao transporteri do 2 tone i
- 650 V3 (teške uslove) za autobuse i velika vozila za preko 3 tone.

"Varta" je u Evropi prva firma koja je učinila veliki korak dalje u proizvodnji akumulatora za kola budućnosti na drumskom saobraćaju. Ako posmatramo s druge strane perspektivnu potrošnju indu-

strijskih akumulatora u našoj zemlji, moramo se prvo osvrnuti na sadašnji veoma nizak nivo potrošnje ovih akumulatora. Pored činjenice da se trakcioni akumulatori još uopšte ne koriste u vozilima za dostavljanje robe kupcima i trgovinama u gradovima, da je razvijenost unutrašnjeg transporta u našoj industriji na niskom nivou, da su još uvek, uzevši u celini, sredstva signalizacije primitivna i nedovoljna (toliki broj saobraćajnih udesa usled nesavremene i nepotpune signalizacije), da je još uvek prilično nerazvijena mreža telefonije - sve je to imalo uticaja i uslovljavalo nizak stepen razvoja proizvodnje industrijskih akumulatora. Bez iniciranja potrošnje i pokazanog interesa za nekim proizvodom na tržištu, nema ni razvijene proizvodnje.

Međutim, izgradnjom početnih kapaciteta u Trepči i Vesni, proizvodnja se nije razvijala kao što se to desilo kod drugih akumulatora (starterskih npr.) ali su pored niske potrošnje osnovni proizvođači ovih akumulatora ipak u svojoj razvojnoj orijentaciji stvorili uslove za osvajanje savremene tehnologije. Pri ovome se misli na pravila, izbor tipova ovih industrijskih akumulatora - sa cevastim pozitivnim pločama (PAS), koji imaju tu glavnu prednost što im je životni vek duži od klasičnih industrijskih akumulatora, koji i za pozitivne ploče koriste olovne rešetke.

Industrijske akumulatore po vrsti, nameni i upotrebi delimo na:

- a) trakcione akumulatore za pogon elektromotora kod elektrokolica, viljuškara, jamskih lokomotiva, motornih čamaca i dr.,
- b) na stacionarne koji se koriste kao izvor elektroenergije kod telefonskih i signalnih uređaja i kao rezervni izvor elektroenergije kod elektrocentrala.

Plasman predviđene proizvodnje je većim delom orijentisan za izvoz. Tako se po predlogu udruženih proizvođača olova i cinka Jugoslavije, u kojem su uključeni i proizvođači akumulatora, predviđa sledeći izvoz akumulatora u narednih pet godina:

	u tonama				
	1976.g.	1977.g.	1978.g.	1979.g.	1980.g.
- po osnovu isporuke metalal P _b	10.000,	11.666,	15.000,	18.333,	21.666
- ind.kooperacija sa C.Zastavom,Kragujevac	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800
- isporuka za široku potrošnju	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
	31.800	33.466	36.800	40.133	43.466

Ovo su podaci koji su predloženi nadležnim organima za sastavljanje robnih lista za period 1976-1980.godine.

Cifre su vrlo impresivne. Podaci su ilustrativni i mogu poslužiti za približno sagledavanje buduće potražnje.

Iako je glavni deo proizvodnje usmeren na izvoz, ni domaće tržište nije za zapostavljanje.

Glavni potrošači industrijskih akumulatora su:

- Fabrika elektrokara, viljuškara, jamskih lokomotiva, liftova za prvu gradnju, PTT, Železnica, Termo i hidroelektrane, i Dostavna akumulatorska vozila.

Krug potrošača industrijskih akumulatora je svakim danom sve širi jer je njihova upotreba u savremenim uslovima neophodnija.

LITERATURA

1. BATTERY NEW AMERICAN BATTERY ELECTRIC CAR (EDITORIAL)
ELECTRIC ELC REV 197(9-10): 275, 1975 No REFS
CAR SHECK TO ORDER TEAR SHEETS AN 916
2. BATTERY BATTERY DESIGN AND CELL TESTING FOR ELECTRIC-
ELECTRIC VEHICLE PROPULSION (MEETING ABSTR.)
VAHICLE SCHERIZ WW CHILENSK. AA KOLBA VM
IEEE AER EL 11(5): 951, 1975 NO REFS
CHECK TO ORDER TEAR SHEETS AT 753
WW SCHERTZ, ARGONNE NATL LAB. CHICAGO, IL

3. BATTERIES BATTERIES - TODAY AND TOMORROW

MENNIE D

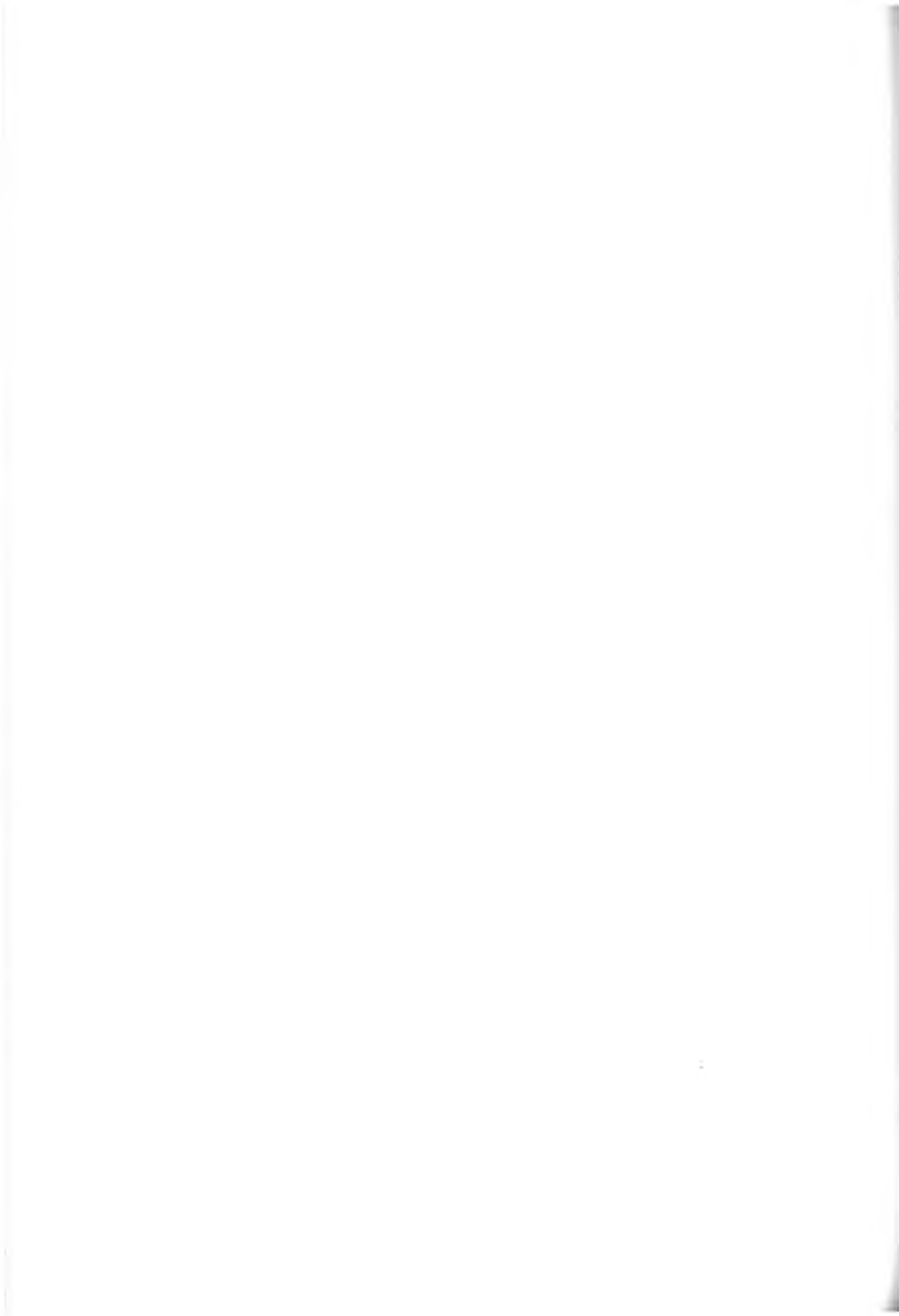
IEEE SPECTR. 13(3): 36-41, 1976

NO REFS

CHECK TO ORDER TEAR SHEETS

BJ 368

4. VARTA BATTERIE AG, PR 37/75
SYSTEMBATTERIE FÜR ELEKTROFAHRZEUGE. EIN SINNVOLLES KONZEPT
FÜR DEN VEHRKEHR VON MORGEN
5. VARTA BATTERIE AG, PR, 38/75
BATTERIEN FÜR BOOTE
6. VARTA BATTERIE AG, PR. 39/75
BATTERIE - EIN MODERNES KRAFTWERK
7. VARTA BATTERIE AG, PR. 41/75
NEUE AUTOBATTERIEN VON VARTA
8. VARTA BATTERIE AG, PR 42/75
ERFAHRUNGEN AUS 12 MONATEN ELEKTROBUS - LINIENVERKEHR
9. VARTA BATTERIE AG, PR 44/75
ERSTE HOCHLEISTUNGS - ELEKTROSTRASSENFAHRZEUG - BATTERIE
AUS DER SERIENFERTIGUNG
10. VARTA BATTERIE AG. PR 45/75
ERSTE HOCHLEISTUNGS - ELEKTROSTRASSENFAHRZEUGBATTERIE
AUS DER SERIENFERTIGUNG



Prof. Vladimir Knapp
Elektrotehnički fakultet, Zagreb

Dr. Emil Coffou
Institut "Rudjer Bošković", Zagreb

NOVI IZVORI ENERGIJE; GEOTERMALNA ENERGIJA SUHIH STIJENA

U diskusijama oko budućeg razvoja energetike često se navodi geotermalna energija suhih stijena kao obilat i, sa stanovišta efekata na okoliš, privlačan izvor. Iznose se podaci o energiji sadržanoj u zemljinoj kori i ukazuje da taj ogroman rezervoar može zadovoljiti sve današnje i daleke buduće potrebe. Zaključuje se dalje na nepotrebnost razvoja sa stanovišta sigurnosti neprivlačne nuklearne energije. U referatu se nešto odredjenije i kvantitativnije ocjenjuju mogućnosti razvoja ovog izvora energije i definiraju osnovni tehnički problemi. Prikazuju se rezultati procjene na bazi različitih fizikalnih modela odvodjenja topline iz suhih stijena. Rezultati i diskusija upućuju na zaključak da se ne može očekivati značajan doprinos ovog energetskog izvora.

NEW SOURCES OF ENERGY; GEOTHERMAL ENERGY OF DRY ROCKS

In discussions about the possible alternatives to fossil and nuclear energy the geothermal energy of dry rocks is often cited as an abundant and environmentally acceptable energy source. Estimates of the enormous heat content of the earth's crust lead to conclusions about their potential being sufficient to satisfy both present and future energy demand. This is often followed by the conclusion that in view of such a vast energy source the development of nuclear energy, unattractive from the safety standpoint, is not necessary. A somewhat closer scrutiny of the potential of dry rock energy exploitation is thus deemed necessary in order to establish a correct framework for the development of both conventional and nonconventional energy sources. In this contribution some results of attempted quantitative estimates are presented. Several physical models for heat extraction have been used, corresponding to various assumptions on rock fracturing and water flow distribution.

The applicability of these models is discussed, with some conclusions about the probable energy output. Geothermal energy becomes attractive only under assumptions which are, at least at present, physically and technically unrealistic. Finally, the safety aspects of geothermal energy are discussed as well, and serious objections pointed out.

1. UVOD

Pri diskusiji geotermalne energije treba razlikovati dva osnovna tipa:

- a) Geotermalna energija vezana uz vulkanske pojave, odnosno termalne anomalije koja se modificira u izvorima vruće vode i pare, odnosno u podzemnim rezervoarima vruće vode
- b) Geotermalna energija suhih stijena

Prvi je tip geotermalne energije od lokalnog značaja. Korištenje toplih izvora datira otkada postoje historijski dokumenti, dok upotreba za proizvodnju električne energije započinje s 1904. godinom, kada je sagrađen prvi eksperimentalni uređaj kod Larderella u Italiji. 1913. već je snaga uređaja bila 250 kW, dok je danas snaga Larderella 390 MW, dakle elektrana srednje snage. Značajna je još elektrana slične snage na Gejzirima u S A D i upola manja na Novom Zelandu. Sveukupna snaga elektrana koje iskorištavaju vruće izvore iznosi danas (ref. 1) ispod 1000 MW. Projekcije za budućnost kreću se u prilično širokom rasponu (ref.2,3)

Dosta pažljiva analiza P.E. White-a (ref. 3) postavlja kao vjerojatnu gornju granicu snagu od 30000 MW. Iako je to za faktor preko 30 više od današnje snage geotermalnih elektrana, ta brojka nije od većeg značaja prema ukupnim svjetskim potrebama električne energije, koje će krajem stoljeća biti znatno iznad 1,000000 MW. Ako se gleda količina toplinske energije u zemljinoj kori do dubina 5 - 10 km, bez obzira na to da li postoje vodeni tokovi ili rezervoari preko kojih se ona može iskoristiti, dolazi se do ogromnih brojaka. No isto je tako vjerojatno da eksploatacija postavlja veoma velike probleme, upravo zbog odsustva prirodnih tokova i ležišta vode kao medija koji prima i prenosi toplinu stijena. Pri tom se ne ulazi uopće u razmatranja problema koji su inače karakteristični za geotermalne instalacije, uzrokovani intenzivnim otapanjem minerala u vrućoj vodi, kao ni u razmatranje efekata na okoliš geotermalne instalacije bilo kojeg tipa.

Studija, o kojoj se u ovom referatu izvještava, ima za cilj da doprinese nešto većoj odredjenosti energetske perspektive ovog potencijalnog izvora, dajući odredjene kvantitativne okvire za razmatranje tehničkih problema.

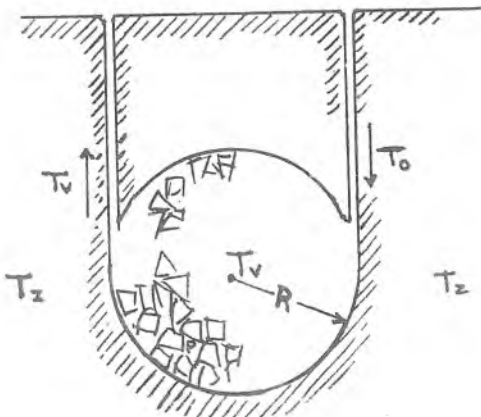
2. OSNOVNE POSTAVKE PROCJENA

Odvođenje i iskorištenje topline iz suhe stijene traži umjetno uvodjenje vode kao rashladne tekućine. Mogućnost iskorištenja kritično zavisi o mogućnosti stvaranja dovoljno velike površine kontakta između stijene i rashladne vode. Razmatranja, koja postavljaju da bi se stijene razdrobile nuklearnim eksplozijama, datiraju još iz 50-tih godina s američkim programom miroljubivog korištenja nuklearnih eksplozija, tzv. Plowshare programom i, nešto kasnijim, sovjetskim programom. Napucavanje stijena hidrauličkim pritiskom ili konvencionalnim eksplozivima koristi se u rudarstvu i naftnoj industriji, no ne u opsegu i na dubinama koje bi bile od interesa za eksploataciju geotermalne energije.

Studija se ogradjuje od ocjenjivanja tehničkih mogućnosti napucavanja stijena, jer bi za više određjenosti bili nužni eksperimenti na terenu, odnosno podaci o efektima podzemnih nuklearnih eksplozija.

Iz analize Cornell sveučilišta (ref. 4) razabire se da podzemne nuklearne eksplozije snage 30 - 50 kt napucavaju i lome stijene u relativno ograničenom području od nekoliko desetaka metara. Ono što se studijom želi postići je semikvantitativna procjena snage koju bi se moglo dobiti u zavisnosti o različitim pretpostavljenim stupnjevima raspucanosti stijena. Procjene time definiraju zadatke eventualnog tehničkog razvoja u tom smjeru.

Pretpostavlja se da se stijena raspucava unutar nekog radiusa R_0 , dok izvan njega ostaje kompaktna. Time se područje, iz kojeg se crpi energija, dijeli u dva koja se bitno razlikuju u vodjenju to-



pline. Za rashladnu tekućinu pretpostavljamo miješanje tako, da je rashladni medij unutar kugle R_0 , koji oplakuje razdrobljene stijene uniformne temperature. Naravno, da takove pretpostavke ne mogu biti ostvarene, te bi dobivena snaga u stvarnim uvjetima bila manja. To je, međutim, prihvatljivo za stanovišta određivanja gornje

granice iskoristive geotermalne energije.

Dotok topline u rashladnu tekućinu, prema tome, dolazi od u nju uronjenih razdrobljenih stijena te preko granične plohe radijusa R_0 iz okolne kompaktne stijene.

Razmotrimo najprije dotok topline iz kompaktne stijene, određen njenom vodljivošću. Time ćemo dobiti uvid o mogućnosti crpljenja energije iz šireg okoliša, nasuprot energiji stijena u unutarnjosti kugle radijusa R .

3. PRORAČUN TOKA ENERGIJE IZ OKOLIŠA

Da bismo odredili protok energije kroz graničnu plohu voda-kompaktna stijena, potrebno je znati termički gradijent na njoj. Temperaturu rashladne tekućine označit ćemo s T_v , a ravnotežnu temperaturu stijene na dubini centra kugle s T_z . Pretpostavit ćemo da se održava stalna temperatura vode T_v , odnosno stalna razlika $T_z - T_v = \Delta T$.

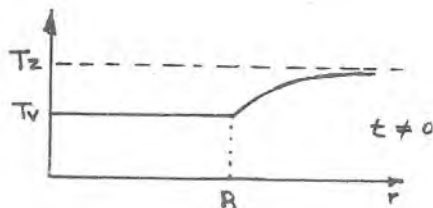
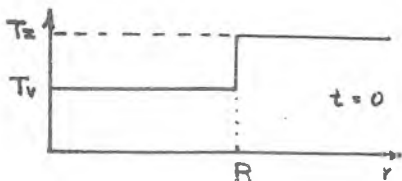
Problem se dakle svodi na odredjenje funkcije radijalne temperature raspodjele $T(r, t)$ u suhoj kompaktnoj stijeni. Tražit ćemo pri tom centralno simetrično rješenje, što znači da pri tome zanemarujemo gradijent uslijed dotoka unutarnjih zemaljskih izvora energije. Usporedba temperaturnog gradijenta koji nastaje odvođenjem topline iz kugle, s tipičnim zemaljskim gradijentom od oko $30-40^\circ/\text{km}$, pokazuje opravdanost ove pretpostavke. Funkciju temperature raspodjele $T(r, t)$ možemo pisati u obliku:

$$T(r, t) = T_v + (T_z - T_v) f(r, t)$$

s tim što funkcija $f(r, t)$ definirana ovom relacijom treba zadovoljavati uvjete $f(r, 0) = 1$ ako je $r > R$

$$f(R, t) = 0$$

koji proizlaze iz temperaturnih raspodjela u vrijeme $t=0$, i u vrijeme t :



Na radijusu $r=R$ temperatura je uvijek T_v , s time što u času $t=0$ na tom mjestu postoji temperaturni diskontinuitet.

Ako toplinsku vodljivost stijene označimo sa v , a specifičnu toplinu (volumen) sa c , parcijalna diferencijalna jednačba temperature funkcije $T(r)$ dana je sa:

$$\frac{v}{c} \Delta T + \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \text{ a isti oblik ima i}$$

jednačba funkcije $f(r)$. Uvodeći pokratu $\frac{v}{c} = a^2$, dobiva se rješenje koje uvažava početni i rubni uvjet u obliku:

$$T(r,t) = T_z - (T_z - T_v) \frac{R}{r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r-R}{2a\sqrt{t}} \right), \text{ gdje je } \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} \cdot dz$$

$$\text{odnosno: } T(r,t) = T_z - \Delta T \cdot \frac{R}{r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r-R}{2a\sqrt{t}} \right)$$

Stacionarno rješenje, kada $t \rightarrow \infty$ ima oblik $T(r, \infty) = T_s(r) = T_z - \Delta T \frac{R}{r}$.

Iz relacije se razabire da je radijus R parametar koji odlučuje o doseg temperature promjena u stijeni. Na radijusu $r = 10 R$ promjena temperature reducirana je na 10% ΔT . Iz relacije za $T(r,t)$ slijedi temperaturni gradijent $\frac{\partial T(r,t)}{\partial t}$ koji određuje tok energije:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T \frac{R^2}{r^2} \left| \frac{1}{R} \operatorname{erfc} \left(\frac{r-R}{2a\sqrt{t}} \right) + \frac{r}{R} \frac{1}{\sqrt{\pi} a \sqrt{t}} e^{-\left(\frac{r-R}{2a\sqrt{t}} \right)^2} \right|$$

Na graničnoj plohi $r = R$ gradijent prima vrijednost:

$$\frac{\partial T(R,t)}{\partial t} = \Delta T \left| \frac{1}{R} + \frac{1}{\sqrt{\pi} a \sqrt{t}} \right|$$

Tok energije kroz graničnu plohu dan je sa $\Phi_R(t) = v \cdot \frac{\partial T(R,t)}{\partial t} \cdot 4\pi R^2$, tj.

$$\Phi_R(t) = v \cdot 4\pi R^2 \Delta T \left| \frac{1}{R} + \frac{1}{\sqrt{\pi} a \sqrt{t}} \right|$$

Tok opada s korjenom iz vremena, i kad $t \rightarrow \infty$ prima stacionarnu vrijednost $\Phi_R(\infty) = v \cdot 4\pi R \cdot \Delta T$

Sa tom graničnom vrijednosti izraz za tok ima oblik:

$$\Phi_R(t) = \Phi_R(\infty) \left(1 + \frac{R}{\sqrt{\pi} a \sqrt{t}} \right)$$

Tok energije direktno je proporcionalan temperaturnoj razlici ΔT . Povećanjem razlike ΔT ubrzavamo crpljenje topline iz okoliša kugle, ali time reduciramo Carnotov stupanj djelovanja μ . Iskoristiva snaga P dana je sa $\mu \cdot \Phi_R(t)$. Ako pretpostavimo da se centar šupljine nalazi na dubini od 5 km, i ako uzmemo da je termalni gradijent u stijeni $40^\circ/\text{km}$, dolazimo na temperaturu stijena od 200°C . Termalni gradijenti stijena variraju u širokom rasponu od 8 do $50^\circ/\text{km}$.

Iako se može argumentirati potreba izbora one lokacije na kojoj je gradijent velik, treba uvažiti da procjene kojima se uka-

zuje na vrlo velike zalihe geotermalne energije u suhim stijenama pretpostavljaju njeno široko eksploatiranje, što isključuje veliku selektivnost lokacija obzirom na termalni gradijent. Za svaku elektranu, pa i za geotermalnu, vrijedit će opći uvjeti za izbor lokacije, u prvom redu blizina centrima potrošnje. Mnoga bušenja, koja bi trebalo načiniti u traženju optimalnih lokacija, koštala bi mnogo, a kada bi se te i našle, pitanje je da li bi se mogle uskladiti s ostalim uvjetima. Ocjenjujemo s toga da je gradijent od $40^{\circ}/\text{km}$ najviše što je opravdano uzeti ako, se želi procijeniti mogućnosti ovog izvora energije u većim razmjerima.

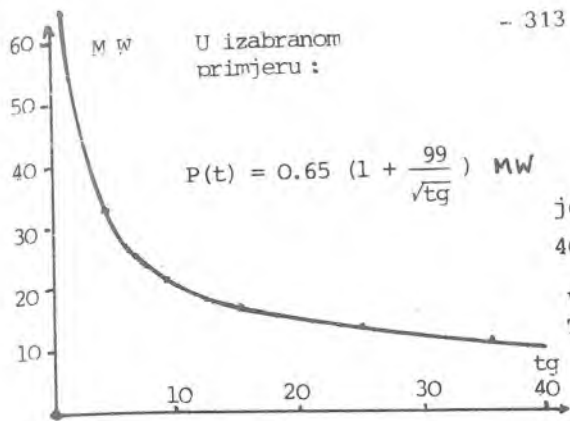
S temperaturom $T_z = 200^{\circ}\text{C}$ i temperaturom toplog vodnog rezervoara od 120°C , te temperaturom na izlazu iz turbine od 20°C te uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka u dovodu tople vode do turbo agregata odnosno toplinskog izmjenjivača, dobili bi Carnotov stupanj djelovanja od približno 25%. Ne možemo očekivati tehnički ostvarivu vrijednost iznad 20%, a vjerojatno je da bi se stvaran stupanj djelovanja nalazio između 15 i 20%. Opravdano je stoga postaviti pitanje o radu u režimu, u kojem bi topli rezervoar bio na višoj temperaturi. No time se smanjuje dotok energije Φ_R i optimalna temperaturna razlika ΔT bit će ona koja daje najveću iskoristivu energiju $P = \eta \cdot \Phi_R$.

Za η imamo: $\eta = \frac{T_z - T_o - \Delta T}{T_z + 273 - \Delta T}$, a iskoristiva snaga:

$$P = \frac{T_z - T_o - \Delta T}{T_z + 273 - \Delta T} \cdot \Delta T \cdot v \cdot 4\pi R^2 \left| \frac{1}{R} + \frac{1}{\sqrt{\pi} \cdot a \cdot \sqrt{t}} \right|$$

S odabranim veličinama $T_z = 200^{\circ}\text{C}$, $T_o = 20^{\circ}\text{C}$ produkt je maksimalan za $\Delta T = 73^{\circ}$. U daljnjoj procjeni računa se sa $\Delta T = 80^{\circ}$, što uvažava dijelom gubitke u cijevima do površine i izmjenjivaču topline. Ako sada odaberemo i odredjeni radius R , možemo dobiti konkretan rezultat. Uzmimo $R = 1000 \text{ m}$, vodljivost $v = 2.6 \text{ W/m}\cdot\text{st}$, kao vrijednost između vodljivosti vapnenca i granita: $\Phi_R(\infty) = v \cdot 4\pi R \Delta T = 2.6 \text{ MW (th)}$. Za iskoristivu snagu $P(\infty) = \eta \cdot \Phi_R(\infty)$ dobiva se 0.65 MW kao graničnu vrijednost ($t \rightarrow \infty$) iskoristive snage. Vremenska procjena iskoristive snage dana relacijom $P(t) = P(\infty) \left(1 + \frac{R}{\sqrt{\pi} \cdot a \cdot \sqrt{t}}\right)$ prikazana je na sljedećoj slici.

Snaga pada ispočetka veoma brzo, a kasnije se sporo bliži stacionarnom stanju. Na kraju prve godine iznosi ~65 MW, nakon devet godina ~20 MW, nakon 36 na 11.4 MW. Naravno da režim rada s tako promjenljivom snagom ne bi bio prikladan. Stoga računamo prosječnu snagu $\bar{P}$ relacijom



$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cdot dt, \text{ s time što}$$

je za vijek elektrane T uzeto 30, 40 i 50 godina. Rezultati su:

Kao što se vidi, i s vrlo optimističkim pretpostavkama o radijusu šupljine, rezultat je veoma skroman.

4. ODVOĐENJE ENERGIJE IZ UNUTARNJOSTI KUGLE

S volumnom spec. topline od 2.5 džul/cm^3 , uz hlađenje stijene za 80 stupnjeva, dobila bi se iz kugle radijusa $R = 1000 \text{ m}$ termalna energija od oko $8 \cdot 10^{17}$ džula, dok bi odgovarajuća iskoristiva energija sa $\eta = 0.2$ bila $1.6 \cdot 10^{17}$ džula. Niska vrijednost faktora iskorištenja odražava padanje Carnotovog stupnja djelovanja s početne P vrijednosti $\eta = 0.25$. Korištenjem ove energije kroz period od 30 god. dobiva se za prosječnu snagu vrijednost od $\sim 170 \text{ MW}$, što je znatno iznad prosječne snage dotokom energije iz okoliša. To nam dozvoljava da u računu odvođenja energije iz unutarjosti kugle taj problem odvojimo od prethodno razmatranog dotoka energije iz okoliša. U daljnjem razmatrat ćemo modele hlađenja unutarjosti kugle, na osnovu kojih se može dobiti uvid u raspucanost unutarjosti, potrebnu da bi se moglo odvoditi korisnu snagu na nivou 150-200 MW.

a) Model kuglastih šupljina

Model koji je najmanje realističan, ali koji omogućuje da se iskoriste već dobivena rješenja, je model relativno malih kuglastih šupljina radijusa $R_m = 1 \text{ m}$ u kugli $R = 1000 \text{ m}$. Za razmak D medju šupljinama uzima se $D = 20 R$, čime se osigurava malo preklapanje temperaturnih polja. Iskoristivu snagu po jednoj maloj šupljini računat ćemo kao i prije relacijom: $P(t) = P(\infty) \left(1 + \frac{R_m}{\sqrt{\pi} a \sqrt{t}} \right)$. Tok se pribli-

žava stacionarnom stanju mnogo brže. Karakteristično vrijeme, za koje je $P(t) = 2P(\infty)$, iznosi svega 3.5 dana, što znači da se u periodima koji se mjere godinama, nalazimo u uvjetima stacionarnog rješenja, i iskoristiva snaga modulirana je samo postepenim padanjem Carnotovog faktora η uslijed hlađenja stijena. Koristeći relaciju $P(\infty) = \eta \cdot v \cdot 4\pi R_m$ s prosječnim $\eta = 0.2$, $R_m = 1 \text{ m}$, a ostalim veličinama kao u dijelu 3,

dobiva se iskoristiva snaga $P(\infty)$ od 0.52 KW po jednoj kugli. Unutar kugle $R = 1000$ m nalazi se, uz $D = 20$ m, $n = 0,52 \cdot 10^6$ malih kugala te ukupna snaga $P = n \cdot P(\infty)$ iznosi $0.52 \cdot 0.52 \cdot 10^6$ KW = $0.27 \cdot 10^6$ KW, odnosno 270 MW. Dobivena snaga veća je od raspoložive prosječne (na 30 g) od 170 MW, što znači da bi ovakav stupanj raspucanosti bio adekvatan za izvodjenje energije iz unutaršnjosti kugle unutar perioda od 30 godina.

Može se prigovoriti ovom modelu neodređenost jer se ista snaga može dobiti različitim vrijednostima razmaka i dimenzija kugala.

Bitno je da se dobije izvjesna predodžba o potrebnoj raspucanosti stijena. Mogli smo, na primjer, izabrati $R_m = 2$ m, a razmak $D = 40$ m, držeći iz istih razloga kao i ranije $D = 20 R_m$. Ova reducirana napucanost stijena pokazuje se već neadekvatnom; kako snaga raste linearno s radijusom, ali broj kugala opada s trećom potencijom razmaka, došli bismo na četvrtinu snage, tj. na 67.5 MW, jedva prihvatljivu vrijednost.

b) Cijepanje u blokove

Model, koji se nešto više bliži ideji napucavanja unutaršnjosti kugle, može se konstruirati na predodžbi cijepanja stijena u blokove oblika kocke određene stranice L . Kroz pukotine između kocaka struji rashladna voda. I ovdje ćemo načiniti pretpostavku o dobrom miješanju i proticanju tekućine, te konsekvatno jednakim uvjetima hladjenja za sve kocke u unutaršnjosti kugle radijusa R . Problem se dakle svodi na problem hladjenja kocke inicijalno na temperaturi T_z , koju se hladi rashladnim sredstvom na temperaturi T_v , $T_z - T_v = \Delta T$. I ovdje rashladnu vodu temperature T_v zamišljamo kao jedan relativno velik rezervoar u odnosu na dotok vode iz turboagregata. Da bismo našli raspodjelu temperature $T(r, t)$ u kocki stranice L , uzeti ćemo funkciju $T(r, t)$ u obliku $T(r, t) = T_v + (T_z - T_v)f(r, t)$, time što za $f(r, t)$ stavljamo $f(r, t) = F(x, t) \cdot F(y, t) \cdot F(z, t)$, budući da geometrija problema preferira pravokutne koordinate. Ako uvažimo da funkcije F treba da isčezavaju na rubu kocke, kao i da početni uvjet $T(r, 0) = T_z$ traži $F(x, 0) = F(z, 0) = 1$, dobivamo rješenja:

$$F(x, t) = \frac{4}{\pi} \sum_n \frac{\sin n \frac{\pi}{L} x}{n} e^{-a^2 \frac{\pi^2}{L^2} n^2 t},$$

gdje indeks n prima samo neparne vrijednosti. Analogna su rješenja za $F(y, t)$ i $F(z, t)$.

Za proračun fluksa topline iz kocke dovoljno je, iz razloga simetrije,

odrediti fluks kroz jednu plohu, recimo određenu sa $z = 0$:

$$\Phi = v \int_0^L \int_0^L \frac{\partial T}{\partial z} dx dy, \text{ odnosno } \Phi = v(T_z - T_v) \int_0^L F(x,t) dx \int_0^L F(y,t) dy \left(\frac{\partial F(z,t)}{\partial z} \right)_{z=0}$$

Sa gore navedenim rješenjima za funkcije F i uvažavajući rubne uvjete, dobiva se prvi i analogno drugi integral:

$$\int_0^L F(x,t) dx = \frac{4}{\pi} \sum_n \frac{1}{n} \int_0^L \sin n \frac{\pi}{L} x dx \cdot e^{-a^2 \frac{\pi^2}{L^2} n^2 t} = \frac{8L}{\pi^2} \sum_n e^{-a^2 \frac{\pi^2}{L^2} n^2 t} = \frac{8L}{\pi^2} \cdot S_2(t)$$

gdje je $S_2(t)$ pokratak za sumu eksponencijalnog reda.

Treći član $\left(\frac{\partial F}{\partial z} \right)_{z=0}$ daje:

$$\left(\frac{\partial F(z,t)}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{4}{\pi} \sum_n \left(\frac{\partial \sin n \frac{\pi}{L} z}{\partial z} \right)_{z=0} \cdot e^{-a^2 \frac{\pi^2}{L^2} n^2 t} = \frac{4}{L} \sum_n e^{-a^2 \frac{\pi^2}{L^2} n^2 t} = \frac{4}{L} S_0(t)$$

gdje je $S_0(t)$ pokratak za rezultirajuću sumu eksponencijalnog reda.

Konačno tok topline kroz stranicu $z = 0$ iznosi:

$$\Phi(t) = 4 \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^2 L \cdot v \cdot \Delta T |S_2(t)|^2 S_0(t), \text{ a za čitavu kocku}$$

$$\Phi_k(t) = 24 \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^2 L \cdot v \cdot \Delta T \cdot S(t) \text{ gdje je } S(t) = |S_2(t)|^2 \cdot S_0(t)$$

Na elektronskom računskom stroju izračunate su sume eksponencijalnih redova $S_0(t)$ i $S_2(t)$ za različite vrijednosti vremena i izračunata funkcija $S(t)$. Za našu procjenu značajna je njena zavisnost o vremenu. Za vremensku zavisnost funkcije $S(t)$ odlučno je da li je vrijeme t veće ili manje od kritičnog vremena t_{kr} određenog relacijom

$t_{kr} = \frac{L^2}{a^2 \pi^2} \cdot S(t)$, a time i tok energije naglo pada, ako je $t > t_{kr}$, s time što se ne bližimo stacionarnom toku, kao u slučaju beskonačnog medija, nego nuli.

Želimo li dakle da se konačna energija sadržana u kocki rasporedi na određeno vrijeme, treba kritično vrijeme biti tog reda veličine. Odaberemo li $t_{kr} = 50$ godina, određena je time dimenzija kocke, iz relacije $t_{kr} = \frac{L^2}{a^2 \pi^2}$ izlazi : $L = 140 \text{ m}$.

Na osnovu izraza za tok energije jedne kocke dobivamo tok energije iz svih kocaka unutar kugle radiusa R

$$\Phi(t) = 24 \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^2 \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{R^3}{L^2} \cdot v \cdot \Delta T \cdot S(t),$$

odnosno iskoristivu snagu

$$P(t) = \eta \cdot \Phi(t)$$

Stavimo li $L = 140 \text{ m}$, $\Delta T = 80^\circ$, ($\eta = 0.20$), $R = 1 \text{ km}$, fizikalne karakteristike stijena kao u prethodnim procjenama, dobivamo:
 $P(t) \sim 150 \cdot S(t) \text{ MW}$ iskoristive snage.

Vremenska promjena iskoristive snage dana je u tablici:

t	t/ k_r	S(t)	P(t) u MW
0.5 god	0.01	5.8	870
5 god	0.1	1.27	190
10	0.2	0.69	107
15	0.3	0.45	67.5
20	0.4	0.32	48
30	0.6	0.17	25.5
40	0.8	0.1	15
50	1	0.05	7.5
100	2	0.0025	0.3

c) Cilindrični kanali

Kao treći način procijeniti ćemo mogućnost ekstrakcije topline stijene protokom vode kroz cijevi, odnosno kanale relativno malog dijametra. Time ćemo dobiti uvid u prilike koje valja očekivati ako se erozijom protok vode u idealiziranoj geometriji modela b) kanalizira na manji broj tokova.

Radi matematskog rješavanja tokove predočujemo ravnim cilindrima radijusa R i dužine L , dovoljno razmaknutima tako da se temperature polja značajno ne preklapaju. Problem se time svodi na odvođenje topline iz beskonačnog homogenog medija temperature T_z u rashladnu tekućinu temperature T_v koja se nalazi u cilindru.

Kao i u prethodnim slučajevima temperaturno polje opisujemo funkcijom $T(r, t)$ u obliku $T(r, t) = T_v + (T_z - T_v) f(r, t)$. Rubni uvjet $T(R, t) = T_v$ svodi se na $f(R, t) = 0$, a uz to postoji i početni uvjet $f(r, 0) = 1$ za $r > R$. Simetrija problema vodi na cilindrične funkcije. Uvažavajući rubni i početni uvjet dolazi se do rješenja

$$f(r, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(kR)N_0(kr) - N_0(kR)J_0(kr)}{J_0^2(kR) + N_0^2(kR)} e^{-a^2 k^2 t} \cdot \frac{dk}{k}$$

Za proračun toka energije dovoljno je znati gradijent $\left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_R$ za koji se dobiva:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_R = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \frac{1}{R} \int_0^\infty \frac{e^{-a^2 k^2 t}}{J_0^2(kR) + N_0^2(kR)} \frac{dk}{k}, \text{ odnosno}$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_R = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \frac{1}{R} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{a^2 t}{R^2} x^2}}{x [J_0^2(x) + N_0^2(x)]} dx,$$

gdje su J_0 i N_0 Besselove i Neumannove funkcije.

Za fluks energije slijedi: $\Phi = \int -v \text{ grad } T \cdot d\vec{s} = -2\pi v \cdot R \cdot L \cdot \Delta T \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_R$

Izraz za fluks energije zgodno je napisati u obliku

$$\Phi = \sqrt{4\pi} v \cdot L \cdot \Delta T \cdot G(\tau) \quad \text{gdje je } \tau = \frac{a^2}{R^2} t \equiv \frac{t}{t_{kr}}, \quad a$$

$$G(\tau) = \frac{4}{\pi^{3/2}} \int_0^\infty \frac{e^{-\tau x} dx}{x [J_0^2(x) + N_0^2(x)]}$$

Asimptotsko ponašanje funkcije $G(\tau)$ je

$$G(\tau) \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\tau}} & ; \tau \rightarrow 0 \\ \ln \tau \frac{2}{\tau} & ; \tau \rightarrow \infty \quad (\ln 2 = 0.5772) \end{cases}$$

Za medjuvrijednosti treba funkciju $G(\tau)$ izračunati numerički.

U donjoj tablici dane su vrijednosti funkcije $G(\tau)$ kao i snaga u primjeru u kojem je uzeto $L = 1 \text{ km}$ i $R = 1 \text{ m}$, $\Delta T = 80^\circ$, a vrijednosti vodljivosti i volumne spec. topline kao u ranijim procjenama; $a^2 = 1.23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $t_{kr} = \frac{R^2}{a^2} = 8 \cdot 10^5 \text{ sek} = 9.40 \text{ dana}$.

Za korisnu snagu $P(t) = \eta \cdot \Phi(t)$ uz $\eta = 0.2$ dobiva se :

$$P(t) = 0.17 \cdot G(\tau) \text{ MW/km}$$

τ	t	$G(\tau)$	$P(t) \text{ kW/km}$
1	9.40 dana	1.40	238
2	18.80 dana	1.12	190
5	47 dana	0.85	145
10	94 dana	0.70	119
100	2.57 god	0.41	70
200	5.14 god	0.36	61
500	25.70 god	0.31	53
1000	51.40 god	0.28	48
10000	514.00 god	0.21	36

5. DISKUSIJA

Prvi dio procjene iznesen u 3. odnosi se na dovodjenje topline iz šireg okoliša, efektivno beskonačnog, u veliku kuglastu šupljinu ispunjenu rashladnom vodom i razdrobljenim stijenama. Rezultati pokazuju da je ovaj dotok skroman u odnosu na sadržaj energije u stijena unutar šupljine. Uz radijus šupljine od 1 km te optimistične pretpostavke o protoku i miješanju tekućine izlazi prosječna snaga od oko 20 MW kroz period od 30 - 40 godina. Ako bi se energija unutar njosti kugle uz $\Delta T = 80^\circ$ iskoristila u periodu od 30 do 50 godina, iskoristiva snaga bila bi 170 MW kroz 30, odnosno 100 MW kroz 50 godina.

U dijelu 4. primjenjena su 3 modela na ocjenu mogućnosti ekstrakcije

topline iz unutarnjosti kugle. Modeli malih kuglastih šupljina i cijepanja u blokove treba da daju predodžbu o stupnju raspucanosti stijena potrebnom da bi se raspoloživa energija iz unutarnjosti kugle iskoristila u periodu od 30 - 50 godina. Model sa šupljinama radijusa $R_m = 1$ m, a na razmaku $D = 20$ m pokazuje se u tom smislu adekvatan. Model, u kojemu je unutarnjost kugle rascijepana u blokove sa stranicama $L = 140$ m, omogućuje prosječnu snagu od blizu 90 MW kroz period od 50 godina. Prema tome, uvaživši optimističke pretpostavke o protoku vode oko blokova, moramo zaključiti da stupanj raspucanosti prema tome modelu predstavlja minimalan zahtjev koji se mora postići želi li se dobiti iskoristiva snaga na nivou kojim se unutarnja energija ekstrahira u periodu 30 - 40 godina.

O tome kakova bi mogla biti struktura razdrobljenosti stijena teško je nešto odredjenijeg reći. To je najprije zavisno o metodi kojom bi se napucavanje vršilo. Dvije metode su u razmatranju. Za obje postoje odredjena iskustva, no ne u uvjetima karakteriziranim velikim dubinama i temperaturama. To su induciranje pukotina eksplozijama i induciranje pukotina hidrostatskim pritiskom. I jedna i druga metoda koriste se na bušotinama za stimulaciju produkcije nafte i plina.

Ako pogledamo najprije eksplozivnu metodu, tada s obzirom na dimenzije unutar kojih se želi proizvesti razdrobljenost, tj. volumen reda veličine kubnog kilometra, ne dolazi u obzir klasičan kemijski eksploziv. Što se nuklearnih eksplozija tiče, podaci o veličini šupljina izazvanih nuklearnim eksplozijama (ref. 4), te empirička zavisnost promjera šupljine o trećem korijenu snage (ref. 5), ukazuju da bi bile potrebne eksplozije snaga daleko iznad 200 kt. Nesumnjivo je da se iz višestrukih razloga sigurnosti treba gledati s velikom rezervom na ovu metodu. Sa stanovišta kontrole širenja nuklearnog oružja nepoželjno je korištenje nuklearnog eksploziva u bilo koje svrhe. Ovo je svakako najozbiljniji prigovor, no postoje i druge neizvjesnosti, poglavito u odnosu na seizmičke efekte i emisiju radioaktivnosti.

Metoda napucavanja hidrostatskim pritiskom nema zamjerki glede šire sigurnosti koje se mogu uputiti nuklearnim eksplozijama. Primjenjuje se tako da se na željenoj dubini bušotina zatvori, i zatim se visokotlačnim pumpama razvija tlak do 1000 atm. iznad hidrostatskog tlaka na tom mjestu. Jednom kad je pukotina nastala, njena propagacija ide i pri manjem tlaku. Eksperimenti pokazuju da se pukotina razvija u obliku tankog, vertikalno orijentiranog eliptičkog diska (ref. 6).

Kao što smo već spomenuli nije poznato kako bi se stijena ponašala pri pokušaju cijepanja na temperaturi od 200 i više stupnjeva. Slučaj pukotine blizak je prvom modelu iscrpljene energije iz beskonačnog medija, ako uzmemo da je površina hladjenja $2R^2\pi$ naprama $4R^2\pi$ u modelu pod 3. Ovakova pukotina radijusa 1 km omogućila bi crpljenje energije s iskoristivom snagom od oko 10 MW kroz period vijeka elektrane. Moguće je da bi se dobilo i više, ako bi hladjenje stijena proizvodilo daljnje pukotine. To je, međutim, neizvjesno, pa i sporno (ref. 6).

Dakako, dobivanje pukotina ovakovih površina je sasvim izvan područja današnjih iskustava. Međutim, ne ulazeći dalje u diskusiju vjerojatnosti ili nevjerojatnosti postizanja potrebne napucanosti stijene, treba još podsjetiti na učinjene veoma optimističke pretpostavke o cirkulaciji rashladne vode. Nedovoljno se zna o vjerojatoj raspodjeli tokova vode, no sasvim je sigurno da će rashladna površina biti znatno reducirana. Moguće je izrazito kanaliziranje tokova vode kao posljedica inicijalne neravnomjernosti, koja bi erozijom bila dalje uvećavana. Kanalizaciju vodenih tokova bolje bi opisivao treći model cilindrične šupljine. S radijusom cilindra od $R = 1$ m prosječna snaga (30 god. period) je svega oko 60 kW/km, što pokazuje da bi kanaliziranje protoka na mali broj tokova drastično reduciralo nivo snage prema modelima a) i b) u dijelu 4. koji opisuju dobru raspucanost.

6. ZAKLJUČAK

Razmatrani su fizikalni modeli odvodjenja topline iz kompaktne vruće stijene, od kojih jedan razmatra dovodjenje topline iz šire okoline šupljine (ili pukotine), a ostali odvodjenje topline iz napucanog područja stijena. Dok prvi model daje samo skromne vrijednosti za iskoristive snage, druga dva pružaju dosta više. Međutim, kritička diskusija pokazuje da su pretpostavke modela veoma teško ostvarive. Namjena i korisnost modela kuglastih šupljina i kockastih blokova je u tome da se pokaže koji je stupanj razdrobljenosti stijena nužan da bi se dobile zanimljive vrijednosti korisne snage. Iz diskusije i modela slijedi da takovu razdrobljenost neće biti moguće, odnosno da je nije vjerojatno, dobiti metodom hidrostatskog pritiska. Prema tome mogućnosti za korištenje geotermalne energije suhih stijena su vrlo skromne dok ostajemo u području klasičnih metoda raspucavanja stijena. Tek uz optimističko gledanje na vjerojatan proces kanalizacije tokova i uz korištenje nuklearnih eksplozija znatne snage, moglo bi se očeki-

vati veće vrijednosti iskoristive snage do 100 MW kroz 30 godina. Prilično je sigurno da bi sigurnosni i politički problemi takovog razvoja bili znatno veći od problema u proizvodnji nuklearne energije, pa se iskorištenje geotermalne energije ne može ni u tom pogledu smatrati preferabilnim razvoju nuklearne energije. I ne ulažeći u ekonomiku takovih instalacija moramo zaključiti da danas nema razloga da se predviđa iole ozbiljniji doprinos geotermalne energije suhih stijena u ukupnoj proizvodnji energije.

REFERENCES

1. J. B. Koenig : Worldwide Status of Geothermal Resources Development
Geothermal Energy, Ed. P. Kruger and C. Otte
Stanford University Press, Stanford, 1973.
2. W. J. Hickel : Geothermal Energy: A special report
University of Alaska, Fairbanks, 1972.
3. D. E. White : Characteristics of Geothermal Resources
Geothermal Energy, Ed. P. Kruger and C. Otte
Stanford University Press, Stanford, 1973.
4. An Analysis of the Economic Feasibility,
Technical Significance, and Time Scale for
Application of Peaceful Nuclear Explosions in
the U.S., with Special Reference to the GURC
Report Thereon
Final Report to U.S. Arms Control and
Disarmament Agency
The Program on Science, Technology and Society
Cornell University, Ithaca, New York, 1975.
5. A.R.W. Wilson : Current Status of Civil Engineering and Mineral
Resources Development Applications of Peaceful
Nuclear Explosions
Proc. Fourth Int. Conference on the Peaceful
Uses of Atomic Energy, Geneva, Sept. 1971, Vol 7,
UN and IAEA, 1972.
6. M. Smith, R. Potter, D. Brown and R.L. Aamodt:
Induction and Growth of Fractures in Hot Rock
Geothermal Energy, Ed. P. Kruger and C. Otte
Stanford University Press, Stanford, 1973.

Branko Milosavljević, dipl.ing.

Združeno elektroprivredno preduzeće, Beograd

KONVERZIJA EOLSKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU PRIMENOM ASINHRONIH GENERATORA

U toku ove decenije, posebno nakon pojave "energetske krize", dolazi do ubrzanog razvoja metoda i sredstava za korišćenje energije vetrova. Ovo je uslovljeno sledećim osnovnim razlozima: poskupljenjem energije; potrebom za zaštitom čovekove sredine i potrebom za dobijanje energije iz obnovljivih izvora.

U ovom referatu se razmatra mogućnost dobijanja električne energije konverzijom aeroenergije instaliranjem velikog broja malih asinhronih aeroagregata u vetrovitim područjima priključenih u niskonaponske mreže elektroenergetskog sistema; problematika integrisanja aeroenergetike u energetske sistem, i predlažu mere za sistematsko uvođenje aeroenergetike u energetske sistem.

WIND ENERGY CONVERSION BY ASYNCHRONOUS GENERATORS

The rate of development of methods and means for tapping wind energy has become much faster in recent years, particularly with the onset of the energy crisis. Several reasons have brought this about: the higher energy cost; environmental considerations; requirements for energy production from renewable sources.

One of the possible ways of electric power production from wind energy involves the installation of a great number of small asynchronous generators in windy areas, connected to the low voltage distribution network. Systematic incorporation of such sources into the electric power system is faced by several problems, and some solutions are suggested.

1. Uvod

Vetar kao energetske izvor se koristi još iz davnih vremena za pokretanje mlino-
va i dolapa (za navodnjavanje), čak 18 vekova pre početka naše ere⁽⁷⁾. U IV-III
veku pre naše ere se javljaju uređaji propelerne tipa. U toku naše ere korišće-
nje vetra kao energetskog izvora je relativno široko primenjivano za mlevenje i
navodnjavanje.

Intenzivnim uvođenjem elektriciteta u upotrebu krajem prošlog i početkom ovog
veka prošireno je korišćenje vetra kao primarnog energetskog izvora. Posebno je
interesantan primer Danske, gde je oko 1910. bilo instalirano preko 30 000 aero
agregata koji su mogli davati ukupnu snagu od oko 200 MW. Ovaj izvor je
odigrao vrlo značajnu ulogu u I svetskom ratu podmirujući značajni deo potreba u

električnoj energiji Danske u ovom periodu. U II svetskom ratu se aktuelnost korišćenja vetra kao primarnog izvora električne energije ponovio ⁽⁶⁾, što po sebi pokazuje na visok značaj ovog energets kog izvora u vanrednim uslovima.

U periodu od 1930. do 1950. god., isticao se veliki interes za razvoj aero agregata velikih snaga u SSSR-u, Nemačkoj, Francuskoj i SAD.

Tada se započelo sa razradom velikih projekata od kojih su neki bili realizovani.

Pad interesovanja za korišćenje energije vetra je nastao u periodu nakon 1950. god., posebno nakon 1960., zbog ekstremno jeftine nafte. Uostalom, u ovom periodu je, sličnu sudbinu doživljavala i proizvodnja uglja.

Nakon pojave "energetske krize" pored ostalih mogućih izvora energije ponovo je obraćena pažnja i na energiju vetra. U SAD se problemom korišćenja energije vetra počinju da bave NSF (National Science Foundation); NASA (National Aeronautic and Space Administration) tako da je energija vetra našla značajno mesto u RD and D programu i ERDA programu, koji se oslanjaju na najnovija dostignuća aeronautike ^(4,6).

Korišćenje energije vetra u SSSR-u predstavlja stalan predmet interesovanja i sistematskih istraživanja i uvođenja, koja je i sam V.I. Lenjin značajno podržao ⁽¹⁾. U tom cilju je osnovan i "Centralni vetroenergetski institut (1930.)", koji se starao o programu razvoja tehničkih sredstava aeroenergetike i njenom uvođenju u primenu do današnjih dana. Razvijen je i uveden u primenu čitav niz aeroagregata raznih namena.

I u drugim zemljama, pored nabrojanih radi se sistematski na uvođenju u primenu aeroenergetike.

Prema sadašnjem stanju bilansnih rezervi fosilnih goriva Jugoslavija spada u energetski siromašna područja (čak nekoliko puta siromašnija od svetskog proseka) ⁽³⁾. Glavna masa raspoloživog uglja su ligniti niske kalorične moći, visoke vlažnosti a neki od njih i sa relativno visokim sadržajem sumpora, što uslovljava tehnološko usložnjavanje korišćenja i specifički skuplju proizvodnju energije uz jednovremeno relativno povišeno zagađenje okoline u odnosu na primenu visokokaloričnih ugljeva. Inače se nalazimo u situaciji da značajan deo visokokvalitetnih fosilnih goriva

uvozimo (nafta, gas). Verovatno je da će postojati i odgovarajuća potreba za uvozom i nuklearnog goriva za buduće nuklearne elektrane.

Ove globalne okolnosti pored ostalih ⁽²⁾ u kojima se nalazi naša energetika obavezuju da se angažovano i aktivno okrenemo istraživanju, razvoju i uvođenju korišćenja obnovljivih izvora energije: sunčeve energije zračenja, energije vetrova (aeroenergija) i geotermne energije, pored već definisane politike korišćenja hidroenergije.

Ovde ćemo razmotriti primenu Tesline asinhronne mašine u sprezi sa mašinama koje je čovek pronašao još pre par milenijuma; u cilju dobijanja nasušnog dobra: električne energije..

2. Aeroenergetski potencijal

Kako vetar predstavlja kretanje fluida u otvorenom sistemu, ne može se govoriti o integralnim snagama i energijama, već samo o njihovim gustinama (snagama, o dn. energijama po jedinici površine preseka postavljenog upravno na pravac kretanja fluida).

Gustina snage se definiše kao kinetička energija fluida koja protekne u jedinici vremena kroz jedinični presek:

$$p = m \frac{v^2}{2} = \rho \frac{v^3}{2} \quad \text{pošto je} \quad m = \rho v$$

gde su: ρ - gustina (kg/m^3), v - brzina (m/sec), p - gustina snage (W/m^2)

Dakle, snaga vetra zavisi od trećeg stepena brzine.

Gustina vazduha zavisi od pritiska i apsolutne temperature i može se smatrati malo promenljivom veličinom (oko $1,25 \text{ kg/m}^3$). Meteorološka služba evidentira srednje satne brzine i maksimalne brzine ili pak "jačine" vetrova izražene u boforima (B). Između brzine i jačine vetra postoji odnos ⁽⁸⁾:

$$v(\text{m/sec}) = 0,831 \sqrt{B^3}$$

Kao mere aeroenergetskog potencijala se mogu uzeti razne veličine. Među najpogodnije spada svakako iznos gustine energije za godinu dana, ili srednja godišnja gustina snage, ali ih meteorološka služba ne evidentira.

Gustina snage vetra u zavisnosti od brzine, odnosno jačine vetra data je u sledećoj tablici:

v(m/s)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
p(kW/m ²)	0,005	0,04	0,135	0,256	0,625	1,08	1,73	2,56	3,65	5,00

B(bofor)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v(m/s)	0,831	2,35	4,31	6,64	9,28	12,2	15,4	18,6	22,4	26,3
p(kW/m ²)	0	0,008	0,05	0,183	0,500	1,14	2,28	4,10	7,00	11,4

Stoga se koriste podaci o srednjim satnim brzinama vetrova, koji se uređuju u dijagrame trajanja, te uvažavajući "faktore udarnosti" vetrova, utvrđuju godišnja gustina energije ili srednja godišnja gustina snage.

Mogu se vršiti analize po sezonama, i na osnovu njih zaključiti da je pretežan deo godišnjeg aeroenergetskog potencijala raspoloživ u hladnom dobu godine, upravo u vreme kada su i elektroenergetske potrebe veće.

Prema dosadašnjem svetskom iskustvu, aeroenergetski proizvodnja postaje rentabilna, ukoliko srednja godišnja brzina vetra prevazilazi 3,5 m/sec za agregate male snage do 5-6 kW; a ukoliko ona prevazilazi 5,5 m/sec, rentabilna je za pogon velikih agregata jediničnih snaga više stotina kilovata,

Prema podacima iz (5) (6), (7), (8) može se proceniti da aeroenergetski potencijali na tlu Jugoslavije spada u onih oko 20% kopnene površine Zemlje sa najbogatijim aeroenergetskim potencijalom.

Prema (1), (5) Jugoslavija spada u područja na kojima bi se moglo dobiti između 2250 i 3750 kWh/kW godišnje, ukoliko bi se gradili aeroagregati za nominalnu snagu pri brzinama vetrova od 25 milja/h (40 km/h). Lako se uočava da se vreme iskorišćenja ovih aeroagregata malo razlikuje od vremena iskorišćenja priličnog broja hidroelektrana.

3. Aeroagregati za proizvodnju električne energije

Efikasna konverzija energije vetra u električnu može se ostvariti primenom aeroagregata. Aeroagregat se sastoji iz aero rotora, prenosnog mehanizma i električnog generatora. Ovome treba dodati i noseću konstrukciju aeroagregata.

Aerorotor se može izvesti u obliku elise ili turbine sa horizontalnom

osom obrtanja ili u obliku Darrius-ovog ili Savonius-ovog rotora sa vertikalnom osovinom. Efikasnost elisnih aero rotora je oko 40-45 %, Darrius-ovih oko 35-37% ⁽⁶⁾, a Savonius-ovih do 30% ⁽¹⁾, računato u odnosu na prispelu snagu vetra koji protiče kroz površinu poprečnog preseka, koga zahvata rotor upravno na pravac vetra.

Prenosni mehanizam ima za cilj da kretni spreg sa aerorotora prenese na radnu mašinu uz jednovremeno prilagodjenje broja obrtaja aerorotora sa potrebnim brojem obrtaja radne mašine.

U svojstvu električnog generatora mogu se koristiti generatori jednosmerne struje, sinhroni generatori i asinhroni generatori. U daljem razmatranju ćemo se baviti samo asinhronim generatorima.

Aerorotori se projektuju tako da aeroagregati mogu započeti sa odavanjem snage pri brzinama vetra od oko 3-3,5 m/sec ⁽⁷⁾.

Asinhroni generator može da radi na dva načina:

- kao samopobudni asinhroni generator
- kao asinhroni generator priključen na električnu mrežu.

Primena samopobudnih asinhronih generatora može doći u obzir na mestima udaljenim od električne mreže, za napajanja potrošača neosetljivih na promenu učestanosti i napona u širem dijapazonu ili za napajanja akumulatorskih baterija preko ispravljača. Samopobudjivanje se može ostvariti priključenjem kondenzatorskih baterija odgovarajućeg kapaciteta. Ovaj način primene nema izrazite prednosti nad primenom sinhronih generatora, pošto sinhroni generatori za ovu namenu mogu biti i asinhronne mašine sa namotanim rotorom, koji se može pobudjivati bilo iz akumulatorske baterije bilo primenom samopobude sa strujnom kompanudacijom. Ovde i dalje ostaje otvoren problem održavanja učestanosti, koji se može rešavati regulisanjem aerorotora, ali tada čitava instalacija značajno poskupljuje; te može doći u obzir u malom broju slučajeva.

Generalno gledano, primena samopobudnih asinhronih (i sinhronih) generatora ne nudi široku perspektivu na sadašnjem nivou tehnologije pa ni u bliskoj budućnosti.

Primena asinhronih generatora priključenih na električnu mrežu međutim, pruža neuporedivo širu perspektivu od primene samopobudnih autonomnih asinhronih ili sinhronih generatora.

Za ostvarenja ovakvog načina rada aeroagregata potrebno je obezbediti minimalne regulacione uslove koji se mogu ostvariti jednostavnom automatikom. Osnovna namena ove automatike je da onemogući ulazak asinhronne mašine u motorni režim. Funkcija automatike se svodi na sledeće:

- aeroagregat se može priključiti na mrežu kada broj obrtaja asinhronne mašine postigne oko 105% sinhronog broja obrtaja,
- aeroagregat se mora isključiti sa mreže kada njegova snaga padne na nulu, odnosno promeni smer (tj. asinhrona mašina predje u motorni režim).

Ova automatika se može realizovati na razne načine. Kao pogodne mogućnosti mogu se koristiti:

- centrifugalni regulator na vratilu asinhronne mašine za davanje komande za uključanje,
- kočnica brojila priključenog na "prag" vetroagregata za davanje komande za isključanje.

U cilju smanjenja pojave "flikera", tj. značajnijih varijacija napona mreže na mestu priključka aeroagregata, potrebno je sprovesti kondenzatorsku kompenzaciju, jer asinhrona mašina u radu na mreži izuzima reaktivnu snagu. Nivo kompozicije treba da odgovara kompenzaciji reaktivne snage za režim praznog hoda asinhronne mašine aeroagregata. Opterećivanja generatora će usloviti povećano izuzimanje reaktivne snage iz mreže, ali s obzirom na pretežno omski karakter imedanse mreže, na koju ovi generatori mogu biti priključeni, pad napona uslovljen povećanim izuzimanjem reaktivne snage, biće kompenzovan porastom napona usled povećanog odavanja aktivne snage, tako da će resultantne varijacije napona biti blage.

Tačan proračun režima rada i naponskih prilika u konkretnim prilikama se uvek može lako provesti.

Ovako opremljen aeroagregat je praktički neprekidno raspoloživ za proizvodnju električne energije (sem u vreme njegovog remonta ili popravki).

Čim se pojavi vetar dovoljne jačine, vetroagregat stupa u dejstvo i proizvodi električnu energiju sve dok duva vetar jačine iznad minimalne.

Lako se uočava da će aeroagregat, pre priključenja na mrežu, raditi u režimu praznog hoda, što znači da će biti lako pokretljiv. S druge strane, nakon priključenja na mrežu, broj obrtaja aeroagregata će se malo menjati i pored toga što se brzina vetra može menjati u širokim granicama, sve dok aeroagregat even-

tualno ne "ispadne" sa mreže ili se sa nje ne isključi. Maksimalna snaga koju će aerogragat odati u mrežu, praktički odgovara pojavi prevalnog momenta asinhronog generatora. Prevalni moment će se pojaviti pri kritičnom klizanju asinhrohe mašine, koja se pak javlja pri broju obrtaja koji prevazilazi sinhroni broj tek za nekoliko procenata.

Zaštiti aeroagregata od "pobega" pri ispadu ili isključenju sa mreže za vreme snažnih vetrova mora se pokloniti odgovarajuća pažnja. Aerorotori i noseća konstrukcija se moraju dimenzionisati da mogu da podnesu najjače očekivane vetrove na mestu postavljanja, ali se električni generatori trebaju mehanički odvojiti od vratila aerorotora, ako njihov broj obrtaja dostigne dozvoljeni broj obrtaja pri pojavi pobega.

Izborom odgovarajućih aerodinamičkih momentnih karakteristika aerorotora može se ostvariti da aeroagregat nastavlja radom, priključen na mrežu i pri veoma snažnim vetrovima. Ovakve karakteristike imaju elisni aerorotori⁽⁷⁾.

4. Integrisanje aeroenergetske proizvodnje električne energije u elektroenergetski sistem

Pojedinačni aeroagregat, kao izvor električne energije, ponaša se kao slučajni, neupravljivi izvor i po vremenu delovanja i po snazi koju odaje, iz čega se može izvući zaključak da on može odavati energiju najlošijeg kvaliteta. Ovo je bio dominantni razlog što se aeroenergetika kod nas praktično i ne uzima u obzir pri istraživanju energetske izvora.

Razmotrimo sada slučaj da raspoložemo velikim mnoštvom aeroagregata instaliranih u područjima bogatim aeroenergetskim potencijalom širom teritorije Jugoslavije, priključenih na niskonaponske mreže elektroenergetskog sistema. Označimo njihovu zbirnu proizvodnju kao aeroenergetska proizvodnja i postavimo pitanje, kakve energetske karakteristike može imati ova aeroenergetska proizvodnja.

Aeroenergetska proizvodnja bi direktno zavisila od rasporeda i jačina atmosferskih strujanja, tj. od stanja aeroenergetskog potencijala i broja snage i rasporeda aeroagregata. Raspored i jačina atmosferskih strujanja podleže u toku godine dosta strogoj zakonomernosti, čak strožijoj no intenzitet i raspored padavina. To drugim rečima znači da se aeroenergetski potencijal može čak bolje prognozirati nego hidroenergetski potencijal.

Jedina razlika u korišćenju aeroenergetskog i hidroenergetskog potencijala je u tome što hidroenergetski potencijal možemo akumulirati u primarnom obliku a aeroenergetski ne možemo, te moramo tražiti pogodnije sekundarne oblike akumulacije.

Aeroenergetski potencijal, dakle, ima slične energetske karakteristike kao i hidroenergetski potencijal čisto protočnih elektrana, pa bi i aeroenergetska proizvodnja imala slične karakteristike.

Aeroenergetska proizvodnja bi se mogla da odvija praktički uvek, jer je veoma mala verovatnoća da na čitavoj teritoriji vlada meteorološka tišina. Tačno je da bi se mogao očekivati veliki odnos između maksimalne i minimalne odate snage kod istog broja snaga i rasporeda aeroagregata, ali kako ovaj vid proizvodnje ne predstavlja osnovni vid proizvodnje električne energije, već njen dopunski vid, ti me se ovaj problem značajno ublažuje.

Elektroenergetski sistem normalno obavlja funkciju transfera energije iz područja u područje, a može obavljati i funkciju akumulacije odgovarajućom politikom angažovanja izvora pa i angažovanjem reverzibilnih postrojenja. Ove normalne funkcije sistem može izvršiti i nad aeroenergetskom proizvodnjom.

Akumulacijom "niskokvalitetne" aeroenergetske proizvodnje u hidroakumulacije elektroenergetskog sistema, rešava se problem akumulacije aeroenergetskog potencijala i istovremeno dobija hidroenergija najvišeg kvaliteta. Dakle, integracijom aeroenergetske proizvodnje u elektroenergetski sistem, i aeroenergetska i elektroenergetski sistem postižu značajan efekat.

Pored ovog efekta treba uočiti još i sledeće efekte integracije aeroenergetike u elektroenergetski sistem.

Aeroenergetska proizvodnja bi se po pravilu odvijala u isturenim tačkama sistema, u najvećoj dubini konzuma čime bi se vrlo značajno uticalo na smanjenje gubitaka, posebno u distribuciji električne energije.

Aeroenergetska proizvodnja ne zagadjuje čovekovu sredinu, jer ne uslovljava ni pojavu otpadnih materija ni otpadnu energiju.

Aeroenergetska proizvodnja se može bilansirati analogno hidroenergetskoj proizvodnji čisto protočnih hidroelektrana i sračunavati njeni ekonomski i energetske efekti, ali se sa njom neposredno teško može operativno upravljati.

5. Problematika investiranja, eksploatacije i održavanja aeroenergetskih izvora

Investiranje u izgradnju aeroagregata može biti društveno, na osnovu plana korišćenja raspoloživih prirodnih izvora, što bi se rešavalo na uobičajeni način.

S obzirom da se mogu graditi aeroagregati malih instalisanih snaga, re- da nekoliko kW, i da se može očekivati da se pretežan deo aeroenergetske proizvod- nje ostvariti pomoću njih, to se ovde mogu angažovati i lokalna i individualna sred- stva. U slučaju angažovanja lokalnih i individualnih sredstava javio bi se kvalitativ- no novi odnos: da standardni potrošač u opštoj potrošnji postane i proizvođač elek- trične energije.

Angažovanje lokalnih i individualnih sredstava u ovoj sferi može pružiti značajne efekte koji se ogledaju u sledećem:

- Dobijanje novog izvora energije bez ili sa relativno malim društvenim sredstvima, uz jednovremeno angažovanje odgovarajućih industrijskih kapaciteta u zemlji.

- Nadzor i održavanje aeroagregata ostaje na brizi lokalnog, odnosno i indi- vidualnog investitora.

Očigledno je da bi ovaj vid investiranja morao biti regulisan odgovaraju- ćim sporazumima i dogovorima koje tek treba razraditi. U ovom smislu biće potrebno izvršiti odgovarajuća prilagodjenja tarifnog sistema, kako bi se stimuliralo u- vodjenje aeroenergetike u proizvodnju električne energije

6. Zaključci i predlozi

Iz napred iznesenog sledi da postoje tehničke mogućnosti za efikasnu kon- verziju vetra u električnu energiju. Primenom asinhronih aeroagregata do krajnjih granica se pojednostavljuje proces konverzije, pošto ovakvi aeroagregati predstav- ljaju spregu dveju načelno najjednostavnijih mašina sa minimalnim zahtevima za re- gulaciju i skromnim zahtevima za održavanje.

Tehnologija proizvodnje aeroagregata ne postavlja vrhunske zahteve ni sa stanovišta radnih operacija ni sa stanovišta materijala (sirovina).

Eksploatacija aeroagregata ne zahteva vrhunsku stručnost, a nadzor nad funkcijom svodi se na najmanju moguću meru.

Održavanje aeroagregata ne zahteva visoko organizovane pogone i može

se svesti na solidno organizovanu servisnu službu podržanu odgovarajućim radio-ničkim pogonima.

Ekonomska efikasnost aeroagregata bitno zavisi od energetske karakteristike vetrova. Prag ekonomičnosti se postiže pri srednjim godišnjim brzinama od oko 3,5 m/sec⁽¹⁾. Ovu granicu ne treba shvatati kao strogu granicu.

Aeroagregati mogu delovati i u uslovima otkaza izvora zasnovanih na vrhunskoj tehnologiji i mogu veoma dobro poslužiti u vanrednim prilikama. Oni mogu delovati u sprezi sa manjim sličnim izvorima (distributivnim elektranama) u odvojenim mrežama.

Aeroagregati mogu značajno uticati na smanjenje gubitaka u mreži područja na koju su priključeni, jer deluju direktno u konzumu i utiču na smanjenje zahteva od elektroenergetskog sistema.

Iskazano smanjenje zahteva može omogućiti transfer ili dodatnu akumulaciju energije u energetske sistem, koja se može dobro iskoristiti u drugim područjima ili u drugo vreme u istom području.

Integrisanje aeroagregata u elektroenergetski sistem predstavlja kvalitativan skok u prednosti primene aeroenergetike u odnosu na čisto lokalnu autonomnu primenu aeroenergetike, jer se time premošćuje bitan nedostatak aeroenergetike: nestalnost vetrova, i nezavisnost pojave vetrova od toka potreba u energiji.

Aeroenergetski potencijal na teritoriji Jugoslavije je značajno natprosečan u odnosu na svetski prosek iz čega sledi da aeroenergetiku treba angažovanje uzeti u obzir.

U cilju uvođenja aeroenergetike u našim uslovima bilo bi potrebno:

- U saradnji sa meteorološkom službom u Jugoslaviji razvijati tačnije metode za utvrđivanje aeroenergetskog potencijala; utvrditi područja bogata aeroenergetskim potencijalom; i izraditi "Katastar" aeroenergetskog potencijala na teritoriji Jugoslavije.

- Instalirati eksperimentalne aeroagregate u cilju sticanja neophodnog eksploatacionog iskustva.

- Angažovati se na razvoju ekonomičnih aeroagregata i aeroagregata u celini.

- Razviti interesovanje za uvođenje aeroenergetike u primenu i podstaći angažovanje lokalnih i individualnih sredstava za ovu svrhu.

- Odgovarajućim dopunama u tarifnom sistemu omogućiti i stimulisati uvršćenje izvora ove vrste u elektroenergetski sistem.

Bilo bi od velikog značaja ako bi se naše akademije nauka prihvatile vođenja istraživačke aktivnosti u ovom području i stale na čelo istraživačkog projekta kojim bi se rešio problem racionalnosti uvođenja aeroenergetike u opštu energetiku, a u saradnji sa elektroprivredom rešavao problem njene primene u elektroprivredi.

LITERATURA

1. Douglas R. C. - Design with wind - Total environmental action. Church Hill Harrisville, Aug. 1975.
2. Milosavljević B. - Mogućnosti i potrebe za racionalnije korišćenje sunčeve energije - Jug. nac. komitet za energiju, Stručni skup: Racionalno korišćenje energije, Beograd, sept. 1975. br. 912-926.
3. Paradjanin, Lj. - Racionalno korišćenje energije - Jug. nac. komitet za energiju, Stručni skup: Racionalno korišćenje energije Beograd, sept. 1975. str. 1-38.
4. Ramakumar. R., Allison, H. J. i Hughes W. L. - Solar Energy Conversion and Storage Systems for the Future - IEEE Transactions on Power apparatus and Systems - Nov./Dec. 1975 N^o 6 p. p. 1926-1934.
5. Savino, J. M. - Wind Conversion System - Workshop Proc. NSF/NASA Dec. 1973.
6. Savino M. J., Eldridge F. R. - Wind Power - Astronautic and Aeronautic, Nov. 1975. p. p. 53-58.
7. Shefter - Ispol'zovanie energii vetra - "Energija", Moskva 1975.
8. Vujačić P. - Meteorologija - "Prosveta" Beograd 1948.

Hrvoje Požar

Elektrotehnički fakultet, Zagreb

OPSKRBA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM U BUDUĆNOSTI

Kratki prikaz otkrića koja su uvjetovala razvoj proizvodnje i potrošnje električne energije s osvrtom na ulogu Nikole Tesle. Razvoj proizvodnje električne energije u svijetu u 20. stoljeću: struktura proizvodnje, opažene tendencije. Proizvodnja električne energije u Jugoslaviji.

Tendencije razvoja: planovi razvoja, prognoze razvoja konzuma, upotreba primarnih oblika energije za proizvodnju električne energije, struktura proizvodnje električne energije u neposrednoj budućnosti. Daljnje povezivanje elektroenergetskih sistema. Izgradnja električnih mreža, prijelaz na vrlo visoke napone. Povećavanje snaga agregata.

Opskrba električnom energijom u daljoj budućnosti. Upotreba nekonvencionalnih oblika energije za konverziju u električnu energiju. Mogućnost zamjene danas upotrebljivanih oblika energije električnom: za transport, za grijanje, za tehnološke procese. Posljedice i problemi koji se pojavljuju uz povećanu potrošnju električne energije: zaštita okoliša, gustoća konzuma, proizvodnja i prijenos velikih snaga.

ELECTRICAL ENERGY SUPPLY IN THE FUTURE

The discoveries controlling the development of electrical energy production and consumption are reviewed in relation to the role of Nikola Tesla. The development of electrical energy production in the 20th century is considered in terms of its structure and observed trends throughout the world and in Yugoslavia.

Developmental trends involve a number of considerations: development plans; anticipated development of consumption; use of primary energy forms in the production of electric power; structure of electric power production in

the near future; future interconnection of electric power systems; construction of electric power networks and introduction of very high voltages; growing generator output.

In the more distant future nonconventional forms of energy will also be converted into electric power, and the substitution of forms of energy currently used in transportation, heating and manufacturing by electric power will become possible. The implications and problems associated with growing electric power consumption include environmental protection, the rate of consumption, and bulk power production and transmission.

.....

Parni stroj bio je dugo vremena jedini stroj za proizvodnju mehaničke energije, koji se mogao postaviti na mjesto gdje je ta energija bila potrebna. Iskorištavanje te energije, međutim, bilo je moguće samo u neposrednoj blizini stroja (remenski prijenos, transmisija). To vrijedi i za iskorištavanje vodnih snaga uz dodatno ograničenje da je ono moguće samo na vodotoku.

Tek otkrićem električne energije postalo je moguće transportirati na veće udaljenosti energiju koja se može lako i bez većih uređaja pretvoriti u mehaničku. Dug je bio put razvoja. 1799. godine pronadjen je električni kemijski element (Volta), 1834. godine (Jacobi) konstruiran je prvi upotrebljivi električni motor, 1866. (Siemens, Wheatstone) izradjen je električni generator, a 1879. (Edison) električna žarulja s ugljenom niti. Međutim, tek otkrićem trofazne struje (Tesla, 1887.) ostvaruje se jednostavna mogućnost pretvorbe električne u mehaničku energiju. 1891. prvi put se prenosi električna energija na veću udaljenost (elektrotehnička izložba u Frankfurtu na Majni), a 1895. Tesla gradi prvu veliku elektranu na slapovima Niagare.

Kraj devetnaestog stoljeća može se, dakle, smatrati početkom elektrifikacije zahvaljujući u velikoj mjeri vizionarstvu i genijalnosti Nikole Tesle.

U dvadesetom stoljeću električna energija postala je neophodna potreba. Ona je u znatnoj mjeri utjecala na razvoj privrede i industrije, omogućila nove tehnološke postupke, automatizaciju procesa proizvodnje, ali i stvorila osnovu za udobniji život.

Proizvodnja, a to je istodobno i potrošnja, električne energije u svijetu brzo je rasla (sl. 1) po stopi koja odgovara približno udvostručenju svakih 10 godina. U manje razvijenim zemljama u početku razvoja porast proizvodnje bio je malen, ali je nakon dostizanja odredjenog stupnja razvijenosti ostvarivan nagli porast koji u nekim slučajevima dostiže i udvostručenje u 5 godina (sl. 2). Pojavu naglog porasta proizvodnje električne energije treba očekivati u budućnosti u danas nerazvijenim zemljama. Polovinom šestog decenija (1956. godine) stavljena je u pogon prva komercijalna nuklearna elektrana. Od tada je stalno rasla proizvodnja u takvim elektranama (sl. 3), pa je ostvarivano udvostručenje u oko 2 godine.

Stalno je rastao udio električne energije u ukupno iskorištenoj energiji. U razdoblju od 1950. do 1973. godine godišnja stopa porasta iskorištene primarne energije u svijetu iznosila je 5,18%, a stopa porasta proizvodnje električne energije 8,88%. U istom razdoblju u Jugoslaviji je ostvarena godišnja stopa porasta iskorištenja primarne energije od 7,80%, a proizvodnje električne energije od 12,35%. U 1950. godini 14,1% od iskorištenih primarnih oblika energije upotrebljeno je za proizvodnju električne energije. U 1973. godini taj je postotak iznosio 25,7%. Pri tom je, naravno, uzeto u obzir poboljšanje stupnja djelovanja elektrana.

Kada se govori o razvoju proizvodnje električne energije u budućnosti, ne može se mimoći pitanje o razvoju korištenja svih oblika energije. Svako predviđanje, međutim, nosi u sebi elemente nesigurnosti, koji su tim izraženiji što je dulje vremensko razdoblje predviđanja. Svaka takva prognoza je diskutabilna, ali nužna i opravdana ne samo zbog sagledavanja bliže budućnosti za koju je danas potrebno donijeti odluke, nego i zbog stvaranja razumijevanja za buduće promjene realnosti i pripreme za te promjene.

Svakako da treba postaviti pitanje s kojim porastom treba računati u budućnosti. Postoje opravdani razlozi da se predvidi usporenje porasta, pogotovo s obzirom na racionalniju upotrebu energije. U tom smislu, međutim, ne smije se ići predaleko. Broj stanovnika na ovoj planeti vjerojatno će još dugo rasti po približno današnjoj godišnjoj stopi porasta, koja znači udvostručenje

u 35 godina. Neprihvatljivo je, a srećom i nevjerovatno, da nerazvijene zemlje i one na početku razvoja, ostanu na današnjem stupnju. Tom povećanom broju stanovnika treba osigurati hranu i to, s obzirom na današnje stanje prehrane velikog broja stanovnika, više hrane nego što odgovara povećanom broju stanovnika. Iscrpljenje bogatijih nalazišta sirovina tražit će preradu siromašnijih minerala, a sve veće količine otpadaka zahtijevat će posebnu brigu za održanje okoliša u stanju koje će spriječiti opasnost od nepovrativih procesa. Navedeni razlozi govore u prilog povećanju potrošnje energije. Kad bi se i htjelo smanjiti potrošnju energije, mislim da ne postoji praktična mogućnost da se to provede, osim najgrublje prisile ili u slučaju velike nestašice.

Ilustracije radi, navedimo podatke jedne prognoze (3) razvoja potrošnje energije u svijetu, koja je izradjena u dvije varijante: niža varijanta računa s godišnjom stopom porasta od prosječno 3,5% godišnje, a viša varijanta sa stopom od prosječno 4,2% godišnje. Pri tome je računato sa znatno većom stopom porasta u zemljama razvoja (6% odnosno 7,5%), a s manjom stopom u razvijenim zemljama (Zapadna Evropa 2,6% odnosno 3,4%; SAD 1,7% odnosno 2,1%). Prognoza je načinjena za razdoblje 1970. do 2030. godine, a predviđjene su različite stope za pojedina 15-godišnja razdoblja, koje opadaju iz razdoblja u razdoblje (navedeni podaci predstavljaju aritmitske sredine stopa porasta). Uz takve pretpostavke potrošnja primarne energije po stanovniku u 2030. godini iznosila bi oko 5,3 t ekv. ugljena (7000 kcal/kg) u nižoj, a oko 8,2 t ekv. ugljena po višoj varijanti. Treba naglasiti da današnja potrošnja primarnih oblika energije iznosi oko 13 t ekv. ugljena po stanovniku u SAD, između 4 i 6 t ekv. ugljena u Zapadnoj i Istočnoj Evropi i u Japanu, a 0,5 t ekv. ugljena u ostalim zemljama.

Razvoj potrošnje i struktura primarnih oblika energije za dvije varijante razvoja vide se na sl. 4.

Rezerve su sirove nafte ograničene (sl. 5). Uz pretpostavku da se nastavi današnji tempo porasta potrošnje (krivulja A na sl. 5), sve rezerve koje se mogu danas sagledati, bit će iscrpljene za oko 25 godina, a ako se računa s nešto usporenim rastom, vijek trajanja se produljuje za 10 godina (krivulja B). Održavanjem potrošnje na nivou koji će uz današnji porast biti dostig-

nut u 1980. godini, iskoristive rezerve bi mogle trajati još 70 godina (krivulja C). Izgleda, međutim, da je s obzirom na iskoristive rezerve, jedino prihvatljiva varijanta (krivulja D) s postepenim smanjivanjem potrošnje nafte nakon 2000. godine. Struktura potrošnje primarnih oblika energije na sl. 4. odgovara krivulji D na sl. 5.

Povišenje cijena sirove nafte u posljednje dvije godine uzrokovalo je povišenje i cijena ugljena, pa su nuklearne elektrane postale konkurentne ostalim tipovima termoelektrana. Zbog toga je došlo do promjene planova izgradnje u mnogim zemljama. Na netom održanom kongresu internacionalne unije proizvođača i distributera električne energije (UNIPED) objavljeni su planovi (11) izgradnje elektrana u 9 evropskih zemalja (OECD) (sl. 6), prema kojima će u budućnosti najveći dio električne energije biti proizveden u nuklearnim elektranama.

Takav razvoj iskorištenja nuklearne energije postavlja niz problema, a u prvom redu onaj o raspoloživim količinama urana. Pokazuje se (sl. 7) da rezerve relativno jeftinog urana ne mogu zadovoljiti potrebe, pa će biti nužno posegnuti za skupljim rezervama. Za višu varijantu razvoja potrošnje energije (sl. 5) ni s rezervama od $33 \cdot 10^6$ tona urana nije moguće zadovoljiti potrebe, ako se želi ostati na danas upotrebljivanim tipovima reaktora (lakovodni reaktori, PWR i BWR). Uvodjenjem oplodnih reaktora znatno se smanjuje potreba urana pa je za nižu varijantu do 2030. godine potrebno oko $10 \cdot 10^6$ tona, a za višu varijantu oko $20 \cdot 10^6$ tona urana. Treba napomenuti da podaci na sl. 7 ne obuhvaćaju ni rezerve ni potrebe urana u SSSR-u i Kini. Osim toga, u račun nisu uključene vrlo skupe rezerve urana koje se nalaze u nekim stijenama i u moru.

S obzirom na rezerve urana, pokazuje se da je nužna izgradnja elektrana s oplodnim reaktorima. Komericijalna upotreba takvih reaktora danas je vjerojatno najspornije pitanje daljeg razvoja energetike. Ima, naime, prijedloga (12) da se za sada ne dopusti komercijalna upotreba oplodnih reaktora, ali da se nastavi s eksperimentalnim pogonom. Taj prijedlog nije posljedica tehnoloških poteškoća koje se pojavljuju u pogonu eksperimentalnih oplodnih reaktora

(poteškoće s tekućim natrijem), nego se - kako se čini - u prvom redu osni-
va na opasnosti od diverzije, jer se u oplodnom reaktoru nalazi nuklearno
gorivo u takvoj koncentraciji koja bez većih teškoća omogućava izradu atom-
ske bombe. S druge strane, danas nije sigurno kada će biti moguće ostvariti
iskorištavanje novih oblika primarne energije (neposredno zračenje Sunca,
geotermička energija, fuzija) u velikom opsegu, pa se u nekoliko zemalja
intenzivno radi na razvoju oplodnih reaktora. Danas je u pogonu nekoliko op-
lodnih reaktora male snage, a u gradnji ili u pogonu su slijedeći reaktori:
Creys-Melville 1200 MW (Francuska, predviđen pogon 1979. godine), Kalkar
300 MW (Sr Njemačka, 1979), Monju 300 MW (Japan, 1980), PFR 270 MW (Vel.
Britanija, u pogonu od 1974), CFR 1300 MW (Vel. Britanija, 1982/83), FFTF termička
snaga 400 MW (SAD, 1977), Demo Plant I 400 MW (SAD, 1980), Ševčenko 1000 MW,
150 MW (SSSR, u pogonu 1973), Bjelojarsk 600 MW (SSSR, u pogonu 1975).

Danas se računa, za 9 zemalja zapadne Evrope (sl. 6), da će u
2000. godini jedna trećina nuklearnih reaktora biti oplodni reaktori, a deset
godina kasnije skoro polovina.

Rezerve su ugljena, promatrano u svjetskim razmjerima, vrlo veli-
ke. Danas se procjenjuje (13) da ukupne rezerve iznose oko $8000 \cdot 10^9$ tona ekv.
ugljena, ali se samo 6% od ukupnih rezerva smatra iskoristivim rezervama ko-
je se mogu iskoristiti primjenom današnje tehnologije i uz današnje ekonomske
uvjete, a 14% su poznate rezerve, u koje su uključene i iskoristive rezerve, za
koje se pretpostavlja da postoje na poznatim nalazištima. U dodatne rezerve
(86% od ukupnih rezerva) spadaju sve ostale rezerve, za koje se može pret-
postaviti da postoje na temelju poznavanja geoloških uvjeta pogodnih za njiho-
vo postojanje, utvrđenih geološkim istraživanjem, a na osnovu sličnosti geo-
loških prilika s onima na poznatim nalazištima. Oko 85% ukupnih rezerva
ugljena nalazi se u SSSR-u, SAD i Kini, pa je veliki broj zemalja upućen na
uvoz ugljena. Osim toga, problem radne snage u rudnicima ugljena, troškovi
transporta, utjecaj na okolinu, te troškovi proizvodnje, ukazuju da ne treba
računati sa znatnim udjelom ugljena u opskrbi energijom. To pogotovo vrijedi
za zemlje s manjim rezervama ugljena. Sigurno je, međutim, da ni rezerve

urana nisu ravnomjerno raspodijeljene, ali potrebne rezerve urana lako je uskladištiti i za dulje vrijeme pogona, što je neizvedivo s potrebnim količinama ugljena. Tako npr. za trogodišnji pogon lakovodnog reaktora potrebno je 8 m^3 uranova oksida, a za trogodišnji pogon konvencionalne termoelektrane $6,000.000 \text{ m}^3$ ugljena. Ta mogućnost uskladištenja urana predstavlja svakako određenu sigurnost opskrbe primarnim oblicima energije. Navedeni podaci odnose se na snagu od 1000 MW.

Poteškoće u opskrbi energijom, koje su se pojavile krajem 1973. godine, skrenule su pažnju na nove energetske izvore: energija zračenja Sunca, energija vjetra i geotermička energija, koji su poznati ali industrijski malo iskorištavani.

Prva dva oblika energije (energija Sunca i energija vjetra) vrlo su raširena, ali je njihovo iskorištavanje, s obzirom na današnji tehnički razvoj, neekonomično. Radi se, s jedne strane, o maloj gustoći energije (oko 200 W/m^2), a s druge o sporijim (Sunce) i bržim (vjetar) promjenama snage. To zahtijeva postrojenja velikih dimenzija, koja bi zbog promjenljivosti snage bila slabo iskorištena. Oba ta faktora utječu negativno na troškove korištenja tih oblika energije.

Danas je moguće poznatim postupcima iskoristiti samo onaj dio geotermičke energije koja se pojavljuje na površini zemlje ili koja se bušenjem može dovesti na površinu (vrući izvori). To je ostvarivo samo u područjima s povoljnim geološkim uvjetima i u slučajevima kad je temperatura dovoljno visoka. Iskorištavanje energije akumulirane u podzemnim stijenama, a to je daleko najveći dio geotermičke energije, nije danas tehnički riješeno.

Prema tome, spomenutim energetske izvorima ne može se danas riješiti problem pred kojim se industrijalizirano društvo nalazi, jer su potrebne velike količine energije, proizvedene sigurno i ekonomično. To, međutim, ne znači da u budućnosti ne treba računati s iskorištavanjem i tih oblika energije, uključujući i energiju nuklearne fuzije, ali kad to bude i tehnički i ekonomski opravdano. Prema današnjim predviđanjima to se može očekivati negdje pred kraj ovog ili na početku slijedećeg stoljeća. S tim je i računato u predviđanjima prikazanim na sl.4 i sl.6.

Razvoj proizvodnje i potrošnje električne energije ovisi, s jedne strane, o opravdanosti transformacije primarnih oblika energije u električnu, te o ekonomskim i tehnološkim prednostima upotrebe električne energije, s druge strane, za zadovoljenje energetske potrebe.

Za proizvodnju mehaničke energije u stabilnim postrojenjima, električna energija ima tolike prednosti pred drugim oblicima energije da ona ima praktički monopolski položaj. Za proizvodnju topline u industrijskim postrojenjima električna energija ima prednost samo kad je potrebno osigurati finu regulaciju i čistoću proizvoda. Za proizvodnju pare, potrebne za tehnološke procese, električna energija normalno nema prednosti pred ostalim oblicima energije, ali postoje brojni procesi za koje nije neophodna vodena para pa se, s obzirom na zahtjeve tehnološkog procesa, može zamijeniti električnom energijom. Eventualni razvoj toplinskih pumpa i tehnike, koja će se osnivati na iskorištavanju toplinskog zračenja, stvorit će nova područja upotrebe električne energije. Sve veća upotreba rashladnih uređaja, kako za tehnološke procese tako i za klimatizaciju prostorijskih, utjecat će na povećanje potrošnje električne energije. Kod malih potrošača električne energije (kućanstvo, obrt, poslovne prostorije i sl.) a za zadovoljenje toplinskih potreba, našla je primjenu zbog elastičnosti primjene, čistoće i udobnosti. Te su prednosti, izbledele, bile presudne za dosadašnji nagli razvoj potrošnje električne energije na tom području primjene, a one će, kako izgleda, prevladati i u budućnosti prijelazom na potpuno elektrificirana kućanstva. Upotreba električne energije u transportu ograničena je s jedne strane zbog velikih investicija koje su potrebne za elektrifikaciju željezničkih pruga, a s druge strane zbog nepovoljnog omjera snaga/težina akumulatora potrebnih za električni pogon cestovnog vozila. Elektrifikacija željeznica ima opravdanja samo u onim slučajevima kad se radi o prugama s velikom gustoćom prometa. Perspektiva uvođenja cestovnih automatskih vozila danas je znatno diskutabilna. Izgleda da će u slijedećih desetak godina njihova upotreba biti ograničena na gradski promet u najgušće naseljenim gradovima i na interni industrijski transport. Zaštita okoline osnovni je razlog njihove upotrebe. Za korisnike, međutim,

takva vozila imaju samo negativne karakteristike (velika težina, mala brzina, smanjena autonomija). Sigurno je, osim toga, da će dalji razvoj tehnike omogućiti nova područja primjene električne energije, pored onih koja su danas razvijena (elektrolize, elektronika, lučne peći itd.).

Toplina oslobođena nuklearnim reakcijama fizije - a kasnije, možda, i fuzije - u svojoj suštini ne razlikuje se od one koju je čovječanstvo iskoristavalo loženjem drveta, ugljena ili derivata nafte. Pomoću te topline mogu se grijati stanovi, proizvoditi para za industriju, električna energija, može se osigurati energija za kemijsku sintezu (proizvodnja tekućih goriva) i za kreiranje molekula (npr. za proizvodnju vodika).

Uz nuklearne reakcije pojavljuje se radioaktivno zračenje, koje može postati opasno po čovjeka i okolinu, pa je potrebno da ono bude odijeljeno zaštitnim nepropustivim zaklonom, kojeg debljina ne ovisi o količini radioaktivne materije koju okružuje. Očito je, dakle, da će specifični troškovi takve zaštite biti to manji što je količina takve materije veća. Zbog toga, preračunato na jedinicu snage, investicije i troškovi pogona takve zaštite, pomoćnih pogona, nadzora, uređaja za zaštitu okoline itd. postaju sve manji što je veća snaga reaktora. To nije ništa drugo nego potvrda već poznatih saznanja da se specifični troškovi industrijskog postrojenja smanjuju s povećanjem njegovog kapaciteta. Ta zakonitost vrijedi normalno u nekim granicama, a u slučaju nuklearnih reaktora gornja granica vrlo je visoka, jer je dio stalnih troškova u troškovima eksploatacije reaktora vrlo visok.

Velike snage znače koncentraciju proizvodnje. Ali tada se pojavljuje elemenat prijenosa energije. Prijenos je topline na veće udaljenosti nepovoljan, jer traži visoke investicije i jer izaziva znatne gubitke. Taj je prijenos to nepovoljniji što je veća udaljenost.

Prema tome, ne dolaze u obzir nuklearne "peći" ili nuklearni "motori" male snage, a niti razgranata mreža za prijenos toplinske energije bez obzira na to da li se radi o toplini iz nuklearnih reaktora ili iz konvencionalnih postrojenja.

Djelovanje tih dvaju ograničenja (snaga reaktora i transport energije) ukazuje na to da će proizvodnja električne energije biti osnovno područje isko-

rištenja nuklearne energije. Transport je električne energije, naime, ekonomičan i ima veliki polumjer dosega. Taj će prijenos u prvom momentu omogućiti supstituciju konvencionalnih nuklearnim elektranama, a kasnije će moći smanjiti potrošnju fosilnih goriva za proizvodnju električne energije. To, međutim, ne znači da će se nuklearna energija iskorištavati isključivo za proizvodnju električne energije, jer nema sumnje da će ona naći primjenu za pogon velikih brodova, za opskrbu toplinom velikih i koncentriranih industrijskih kompleksa, za grijanje gradskih zona s potrošnjom velike gustoće, a da se ne govori o upotrebi za proizvodnju slatke vode, vodika i sl. Tada će se toplina iz nuklearnih reaktora neposredno iskorištavati, ali to će biti opravdano kad budu ispunjeni određeni ekonomski i tehnički zahtjevi (u prvom redu znatna koncentracija potrošnje), koje nije lako zadovoljiti. U svakom slučaju, međutim, visoke specifične investicije, potrebne za gradnju reaktora, traže visoko iskorištenje takvih postrojenja, što omogućuje njihova upotreba za proizvodnju električne energije zbog raznovrsnosti upotrebe i mogućnosti zadovoljenja vršnih opterećenja drugim tipovima elektrana (pumpno-akumulacijska postrojenja, visoko instalirane hidroelektrane, stare konvencionalne termoelektrane).

Iskorištavanje novih izvora energije praktički je moguće samo transformacijom u električnu energiju. To u potpunosti vrijedi za energiju vjetera i za veće količine geotermičke energije. Istina, moguće je decentralizirano iskorištavanje Sunčeve energije za grijanje stanova i javnih objekata, ali upotreba te energije u većem opsegu, a samo takvo iskorištenje može imati znatnijeg utjecaja na opskrbu energijom u daljoj budućnosti, moguće je zbog potrebnih velikih površina samo u područjima koja su praktički nenaseljena i na površinama koje ne mogu poslužiti u druge svrhe, pa je - kako je već navedeno - nužno energiju zračenja Sunca transformirati u električnu energiju kako bi se mogla prenijeti do područja potrošnje.

Danas se često spominje mogućnost upotrebe vodika kao goriva. To je transformirani oblik energije, pa su za njegovu proizvodnju potrebni drugi oblici energije. Polazeći od vode kao sirovine za proizvodnju vodika, danas su praktički ostvariva dva načina za disocijaciju vode: elektrolitički i termo-

kemijski postupak. Za elektrolizu potrebna je električna energija, ali ona je tehnički razvijena, i danas ne predstavlja tehnološki riziko. Ona, međutim, traži relativno visoke investicije i 4,1 do 4,8 kWh električne energije za proizvodnju nm^3 vodika. Postoji niz mogućih termokemijskih postupaka. Malo je vjerojatno da se najjednostavnijim postupcima, s dvije reakcije, a uz temperature koje su tehnološki prihvatljive (manje od 1000°C), mogu postići bolji stupnjevi djelovanja nego elektrolizom. Ima, međutim, procesa s većim brojem reakcija koje se mogu ostvariti uz temperature reda veličine 800°C , ali s povećanjem broja reakcija smanjuje stupanj djelovanja, povećava se količina produkata, pojavljuju se poteškoće separacije reaktanata koje treba reciklirati ... Ako ne uzmemo u obzir izgaranje fosilnih goriva, jer ne bi imalo smisla proizvoditi vodik energijom fosilnih goriva, toplina iz današnjih lakovodnih reaktora ne može se upotrijebiti za termokemijsku proizvodnju vodika, jer su temperature pare na izlazu iz reaktora preniske. Dolaze u obzir visokotemperaturni reaktori, ali oni su danas tek u razvoju. Za upotrebu vodika kao goriva potrebno je, dakle, premostiti tehnološke poteškoće same proizvodnje vodika, ali i razvoj temperaturnih reaktora. To se vjerojatno može očekivati kroz 15 do 20 godina.

Transport vodika ima slične ekonomske i ekološke karakteristike s transportom zemnog plina, a u nekim slučajevima povoljniji je nego transport električne energije. Za prijenos velikih količina energije potrebni su vrlo visoki naponi, a oni - kako će se još vidjeti - zahtijevaju znatne širine trasa. U budućnosti će se svakako pojaviti problem slobodnog prostora, pogotovo u gusto naseljenim područjima, pa će biti i ekonomski i ekološki povoljnije izvesti taj prijenos energije u obliku vodika, pogotovo u slučaju ako ne bude moguć prijenos velikih količina energije pomoću podzemnih kabela.

Osim toga, vodik, kao i zemni plin, može se uskladištiti bilo za dnevnu ili sedmičnu regulaciju potrošnje, bilo za mjesečnu regulaciju (u podzemnim kavernama). To bi omogućilo bolje iskorištenje postrojenja za proizvodnju topline i za proizvodnju vodika, što bi imalo za posljedicu niže troškove i manje proizvodne kapacitete.

Konačno, vodik se može distribuirati potrošačima na način analogan distribuciji zemnog plina ili se može transformirati u električnu energiju u

bilo kojoj točki transportnog i distributivnog sistema. Konačni je produkt izgaranja vodika čista voda, pa njegovo izgaranje u bilo kojoj točki sistema nema negativnog utjecaja na okolinu. Vjerojatno je da transformacija energije vodika u električnu energiju dolazi u obzir, kad budu dovoljno razvijene gorive baterije (vodik - zrak), jer se takvom transformacijom može osigurati povoljniji stupanj djelovanja nego motorima s unutrašnjim izgaranjem, a pogotovo parnim postrojenjima.

U daljoj budućnosti, prema tome, ima izgleda da vodik postane jedan od važnih nosilaca energije. Udio vodika u opskrbi energijom može biti znatniji tek početkom slijedećeg stoljeća. U međuvremenu, kroz slijedeća dva-tri decenija, električni sistem prijenosa i distribucije energije imat će više ili manje dominantan položaj u energetsom sistemu.

Promatrano iz današnje situacije, a uzevši u obzir današnja saznanja, može se zaključiti da će udio električne energije u opskrbi energijom rasti i da će prema nekim procjenama krajem stoljeća dostići vrijednost od oko 50%. S tim se računa u zemljama OECD (5). Interesantni su rezultati jedne ekometrijske analize (14), prema kojoj bi udio električne energije u ukupnoj energiji u Francuskoj trebao iznositi:

	1980.	1985.	1990.	2000.
industrija	31,5	33,9	35,8	40,9 %
promet	3,6	3,6	5,2	7,1 %
ostali potrošači	32,0	41,1	50,1	58,2 %
ukupno	25,5	30,6	34,9	40,7 %

Ako prihvatimo prognoze prikazane na sl. 4, te ako računamo da će 40% od ukupne energije biti utrošeno za proizvodnju električne energije (0,33 kg ekv. ugljena po kWh), potrošnja električne energije po stanovniku u svijetu u 2000. godini iznosit će između 4520 (niža varijanta) i 4870 kWh (viša varijanta), što odgovara današnjoj potrošnji električne energije u SR Njemačkoj, a polovini današnje potrošnje u Švedskoj i SAD. Tolika potrošnja po stanovniku znači ukupnu godišnju potrošnju, koja će biti između 4,5 do 5,0 puta veća od one ostvarene

u 1975. godini. Naravno da potrošnja električne energije neće biti jednoliko raspodijeljena, pa će u razvijenim zemljama premašiti 3 do 4 puta današnju potrošnju, pa će npr. u zapadnoj Evropi dostići potrošnju od oko 15000 kWh po stanovniku, što je manje od današnje potrošnje po stanovniku u Norveškoj, koja ima najveću specifičnu potrošnju električne energije.

Toliko povećanje potrošnje znači da će u slijedećih 25 godina biti potrebno izgraditi 4-5 puta toliko elektrana koliko ih danas postoji. Sve danas postojeće termoelektrane bit će, naime, kroz to vrijeme tehnički dotrajale, pa novim elektranama treba ne samo osigurati porast potrošnje nego i zamjenu starih elektrana. I tako će brzi tempo razvoja potrošnje i ekonomski razlozi (smanjenje specifičnih investicija) tražiti izgradnju što većih proizvodnih jedinica, što će biti i moguće zbog međusobno sve većeg povezivanja elektroenergetskih sistema. Danas su međusobno povezani dijelovi kontinenta (zapadna grupacija UCPTE, istočna SEV), a sutra će cijeli kontinenti, pa i više, predstavljati tehnički jedinstvene elektroenergetske sisteme (povezivanje elektrana u Sibiru s evropskim dijelom SSSR-a).

Nuklearni reaktori mogu se izgraditi za znatno veće snage nego što se danas grade. Snage parnih turbina i generatora ograničene su mehaničkim naprezanjima. Znatno povećanje snaga sinhronih generatora moguće je upotrebom supravodljivih materijala za izvedbu uzbudnog namota. Danas se smatra (17) da je granična snaga dvopolnih sinhronih generatora oko 2100 MVA (promjer rotora 1,5 m, duljina aktivnog željeza 10 m). S danas raspoloživim materijalima može se (18) postići za dvopolne supravodljive generatore granična snaga od oko 3500 MVA, a za četveropolne oko 7000 MVA. Generatori sa supravodljivim uzbudnim namotom imaju bolji stupanj djelovanja od konvencionalnih generatora za oko 0,3% (uzevši u obzir i potrebnu snagu za hlađenje koja iznosi 0,02% od snage generatora) i znatno manju sinhronu reaktanciju. Usporedba konvencionalnog i supravodljivog generatora (18) snage 1000 MVA pokazuje da je ukupna duljina supravodljivog generatora znatno manja (9 m prema 18 m), to vrijedi za težinu (370 t prema 580 t) i za gubitke (7 MW prema 12 MW). Prema nekim procjenama (19) troškovi supravodljivog

dvopolnog generatora postaju povoljniji od troškova konvencionalnog generatora za snage veće od 750 MVA (za četveropolne generatore ta je granica 1500 MVA).

Može se očekivati da će se do početka devetog decenija supravodljivi generatori razviti u pogonski sigurne strojeve.

Praktički svu proizvedenu energiju preuzima prijenosna mreža, koja je preko distributivne mreže predaje potrošačima. Takvo stanje imamo danas, kad je koncentracija snage elektrana relativno malena u odnosu na onu koja se može očekivati u budućnosti. Uzevši u obzir sigurnost s obzirom na okolinu i raspoloživost vode za hladjenje (za sve tipove termoelektrana) te rezerve goriva i ograničenja transporta (za konvencionalne termoelektrane) može se konstatirati da je mogući broj lokacija za termoelektrane velikih snaga ograničen. Zbog toga će se nastojati da se na povoljnim lokacijama izgradi veći broj proizvodnih jedinica. To pogotovo vrijedi za nuklearne elektrane i za konvencionalne elektrane ložene ugljenom niske ogrjevne moći, pa se mogu očekivati i ukupne snage takvih elektrana i do 10 000 MW.

Prilagodjavanje prijenosne i distributivne mreže povećanju snage vrši se etapno, kako pokazuje dosadašnji razvoj. U početku se povećava broj vodova zadržavajući naponsku razinu, a zatim se gradi superponirana mreža višeg napona, koja ima prijenosne vodove 3 do 6 puta većeg prijenosnog kapaciteta. Osim toga povećanje prijenosne moći vodova 245 i 420 kV ostvareno je povećanjem broja vodiča po fazi. Uloga naponskih razina vremenom se mijenjala. Vodovi 30 kV bili su pred 40-50 godina prijenosni vodovi, danas su vodovi s naponom 110 kV distributivni, a do kraja stoljeća to se može očekivati za vodove 420 kV.

Danas se može ocijeniti (7) da vodovi 420 kV za desetak godina neće biti dovoljni za prijenos potrebnih snaga u evropskoj mreži, pogotovo kad se računa s koncentracijom proizvodnih kapaciteta. Zbog toga se i proučavaju svi aspekti uvođenja višeg napona (8). Problem planiranja razvoja mreže, međjutim, vrlo je kompliciran kad se radi o vrlo visokim naponima (reda 1000 kV), jer pri tome treba uzeti u obzir ne samo ekonomske kriterije

nego i utjecaj ograničenja koje postavlja zaštita okoline. Taj je utjecaj:

a) zauzimanje prostora duž trase voda, b) zvučne i radiosmetnje djelovanjem korone i c) pojava jakog električnog polja ispod voda. Vod 765 kV, koji su danas kao slijedeći napon prihvatile neke zemlje, traži slobodni koridor širine 85 m duž voda, a vod napona 1500 kV čak širinu od 145 m. S povećanjem napona smanjuju se troškovi prijenosa. Ako se računa s investicijama od 80.10³ \$/km (cijene iz 1972. godine) za vod 765 kW, specifične investicije prijenosa iznose 26,7 \$ po MVA i km, jer takav vod može prenijeti 3000 MVA. Za više napone dobivaju se specifične investicije od 19,7 (za napon 1100 kV) i 13,4 \$ po MVA i km (za napon 1500 kV). Pokazuje se (10) da postoji neki maksimalni napon 1400 kV iznad kojeg nema ekonomskog opravdanja graditi zračne vodove.

Utjecaj na okolinu može se eliminirati postavljanjem podzemnih kabela umjesto zračnih vodova, ali takvo rješenje je danas mnogo skuplje (sl.8). U odnosu na zaštitu okoline prijenos istosmjernom strujom povoljniji je od izmjeničnog prijenosa. On traži manju širinu koridora i manje investicije. Upotreba istosmjerne struje za prijenos velikih snaga traži, međutim, rješenja koja će omogućiti stvaranje prave učvorenene mreže vodova istosmjerne struje, jer su svi do danas izgrađeni vodovi samo spojevi među dvjema mrežama izmjenične struje. S druge strane izgleda da su uredjaji s tiristorima za pretvaranje dviju vrsta struje danas dostigli takav razvoj koji osigurava dovoljnu sigurnost.

Upotreba supravodljivih kabela omogućit će prijenos vrlo velikih snaga (više desetaka GW po vodu), upotrebu relativno niskih napona (20-30 kV) u odnosu na danas potrebne napone za prijenos snage reda veličine 10 GW. I pored toga što su gubici snage u supravodljivim kabelima zanemarivo maleni, troškovi prijenosa - prema današnjem stanju razvoja tehnike - još su uvijek znatno veći od prijenosa zračnim vodovima (sl. 8). Supravodljivi kabeli, međutim, predstavljaju idealno rješenje za dovodjenje vrlo velikih količina električne energije u buduće velike gradske aglomeracije.

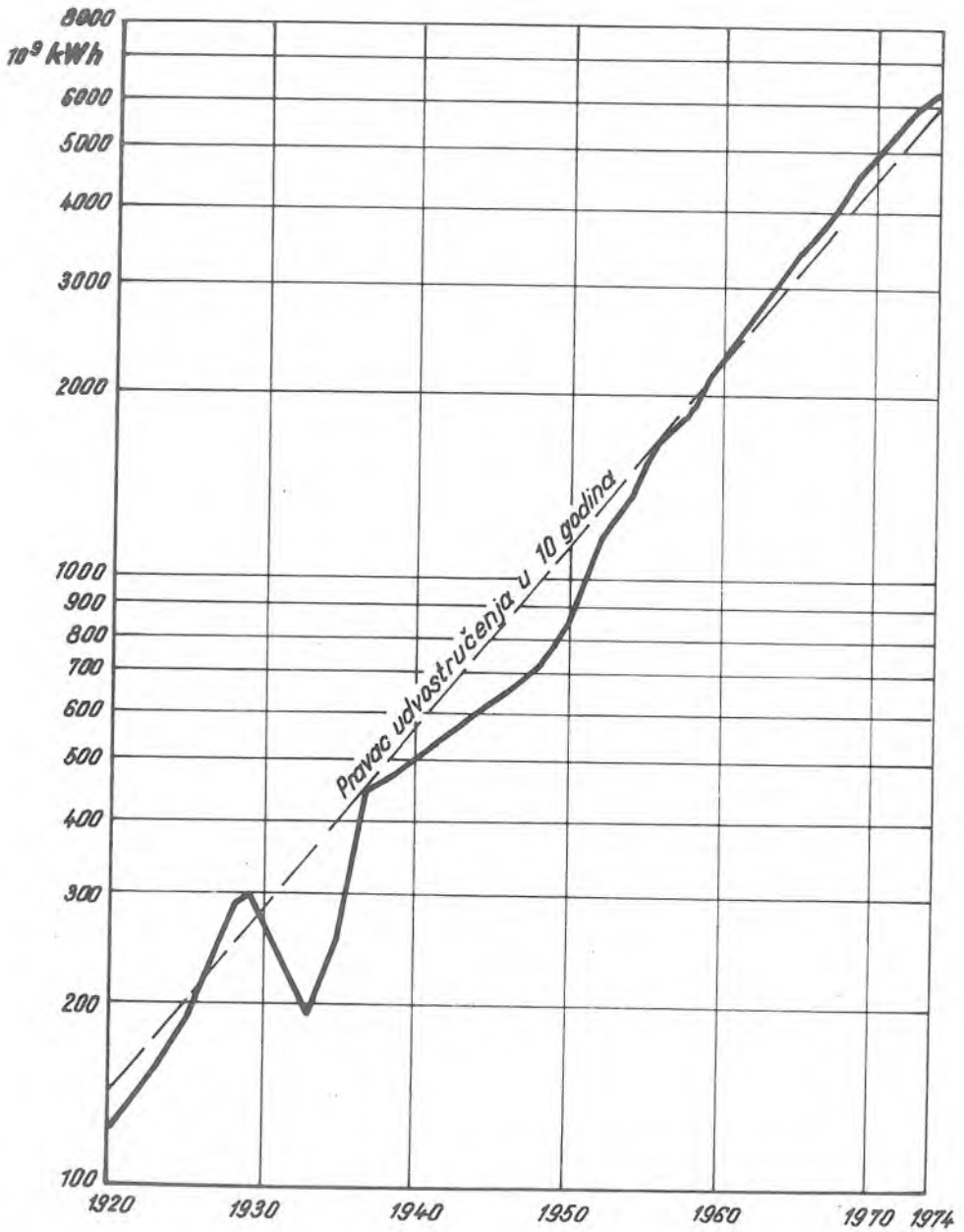
Za neposrednu budućnost prijenos zračnim vodovima predstavlja, izgleda, jedinu racionalnu mogućnost. Istosmjerni prijenos sve će više

konkurirati izmjeničnom zbog manjeg utjecaja na okolinu. U tom razdoblju će kabeli, pogotovo supravodljivi, imati prednost - uz znatno više troškove - samo u vrlo gusto naseljenim područjima. U daljoj budućnosti, za prijenos vrlo velikih snaga rješenje će se vjerojatno tražiti između prijenosa električne energije supravodljivim kabelima i transporta vodika, a možda i prijenosa mikrovalovima ili čak laserskim zracima. Već upotreba vodika kao energetskog goriva s njegovim izgaranjem u gorivim ćelijama izmijenit će bitno koncepciju prijenosa i distribucije električne energije.

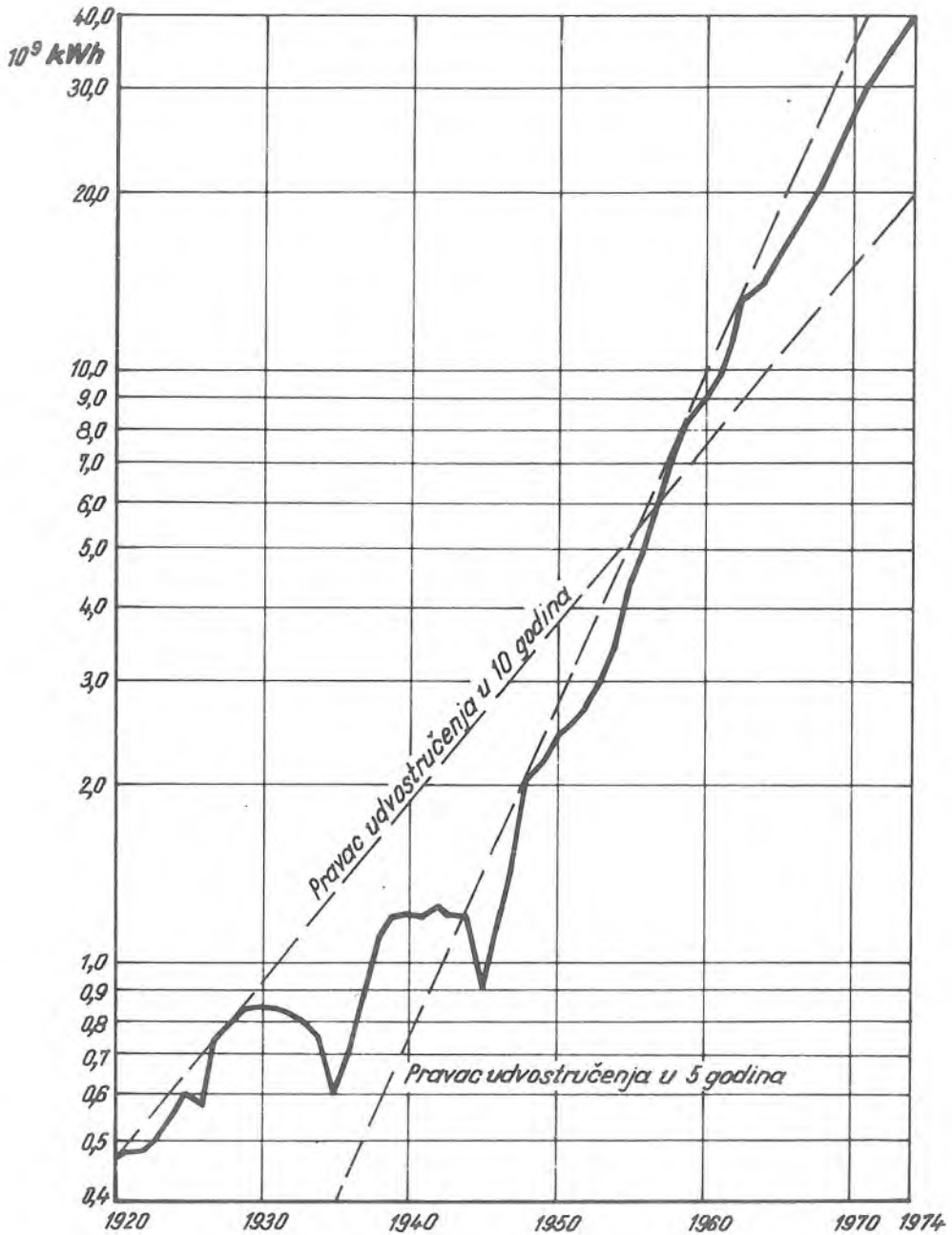
Literatura

1. Statistical Yearbook 1974, United Nations, New York 1975.
2. World Energy Supplies 1970-1973, United Nations, Statistical Papers Series J, No. 18, New York 1975.
3. Giraud, A.: Rôle et importance du nucléaire dans la réalisation des besoins en énergie, Revue de l'énergie, 26 (1975), str. 751.
4. Robin, A. - L. Puiseux: La croissance à long terme de la consommation d'électricité Revue de l'énergie, 26 (1975), str. 572.
5. Laigroz, J. - R. van den Damme, Contribution possible de l'électricité à l'amélioration des bilans énergétiques européens, UNIPED, Congrès de Vienne 1976, Rapport 00.01.
6. Angelini, A.M.: Of Electric Power Transmission - the Evolution and the Environment, Electra, 1975, br. 37, str. 19.
7. Angelini, A.M.: Rapport du président, UNIPED, Congrès de Vienne 1976, Rapport 10.01.
8. Rapport final du groupe ad hoc UHT de la CIGRE, Electra, 1972, br. 24, str. 9.
9. Legrand, B.: Fabrication d'hydrogène - Electrolyse et cycles thermochimique. Mise en œuvre et approche économique, Revue de l'énergie, 26 (1975), str. 799.
10. Ailleret, P.: Le plafond économique des ultra-hautes tensions. Théorèmes de base dans l'analyse d'un système de lignes aériennes en parallèle, Revue générale de l'électricité 81 (1972), str. 799.

11. Perspectives de développement des surrégénérateurs rapides dans la Communauté Européenne des neuf, Comité d'énergie nucléaire, UNIPED, Congrès de Vienne 1976, Rapport 10/D.1.
12. Lewis, R.: Energy plan, New Scientist, 25. July 1975, str. 227.
13. Survey of Energy Resources 1974, US National Committee of the World Energy Conference, New York 1974.
14. Finon, D.: Un modèle énergétique pour la France, Editions du centre national de la recherche scientifique, Paris 1976.
15. Statistički godišnjak elektroprivrede SFRJ za 1974. godinu. Zajednica jugoslavenske elektroprivrede, Beograd 1975.
16. Bamberg, C.E. - D.M. Richardson, Hydrogen production from water by thermochemical cycles, Cryogenics 16 (1976), str. 197.
17. Serogl, J.: Probleme bei der Steigerung der Leistung von Synchron-
generatoren insbesondere bei Anwendung einer supraleitenden Erreger-
wicklung, Bulletin ASE, 66 (1975), str. 318.
18. Bratoljić, T.: Turbogeneratoren mit supraleitender Erregerwicklung,
Bulletin ASE 64 (1973), str. 1040.
19. Kullman, D.: Supraleitende Generatoren und Motoren, VDI - Bildungswerk.
20. Schwab, A.M. - L. De Schamps, Electric power transmission by cryo-
cables, Proceedings of the Furth International Cryogenic Engineering
Conference, Eindhoven 1972, str. 168.
21. Ihara, S.: Cost comparison of superconducting cables and hydrogen
pipelines for energy transportation, Proceedings of the Fifth International
Cryogenic Engineering Conference, Kyoto 1974, str. 187.

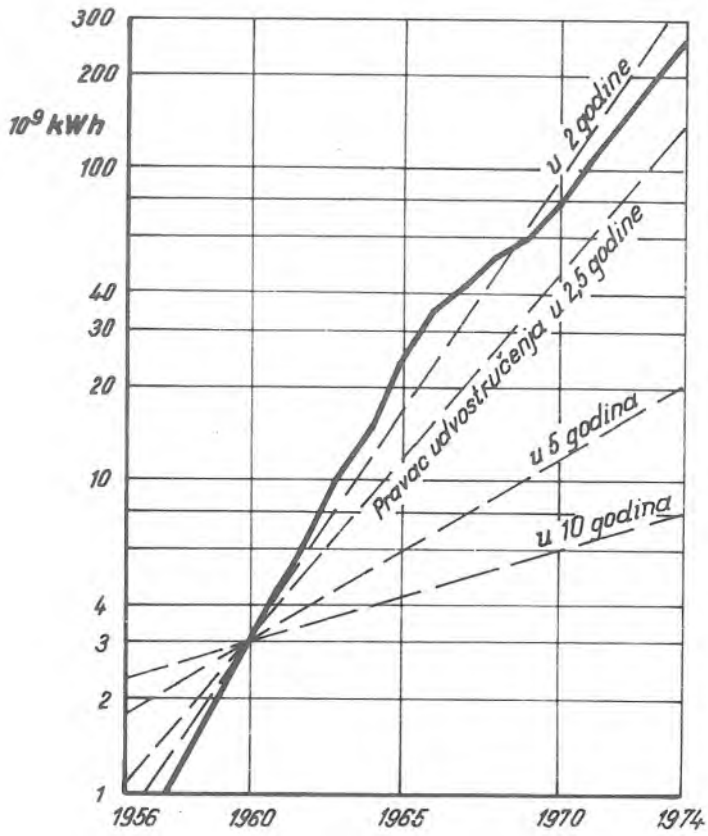


Sl. 1.
Razvoj proizvodnje i potrošnje električne energije u svijetu



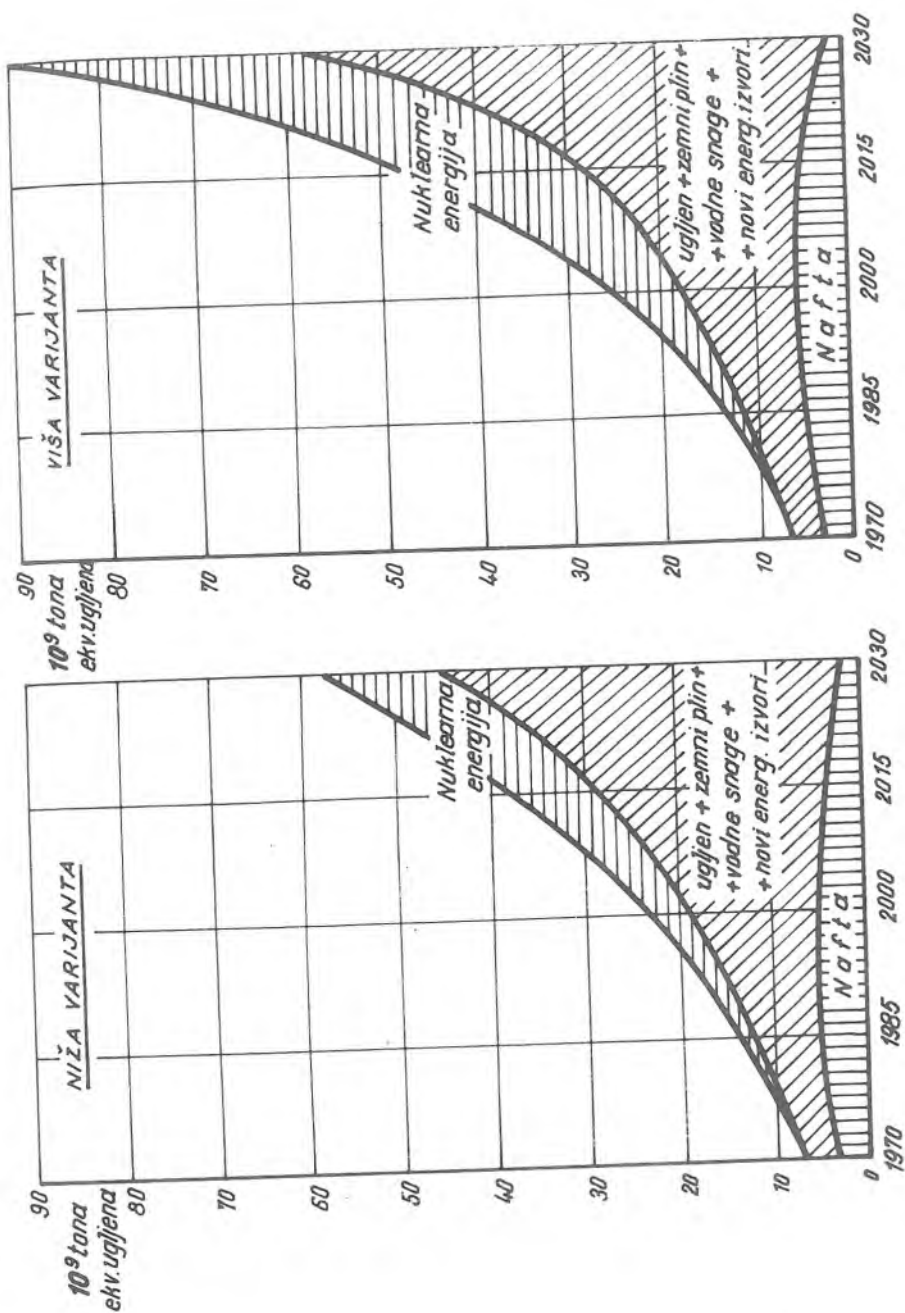
S1.2.

Razvoj proizvodnje i potrošnje električne energije u JUGOSLAVIJI



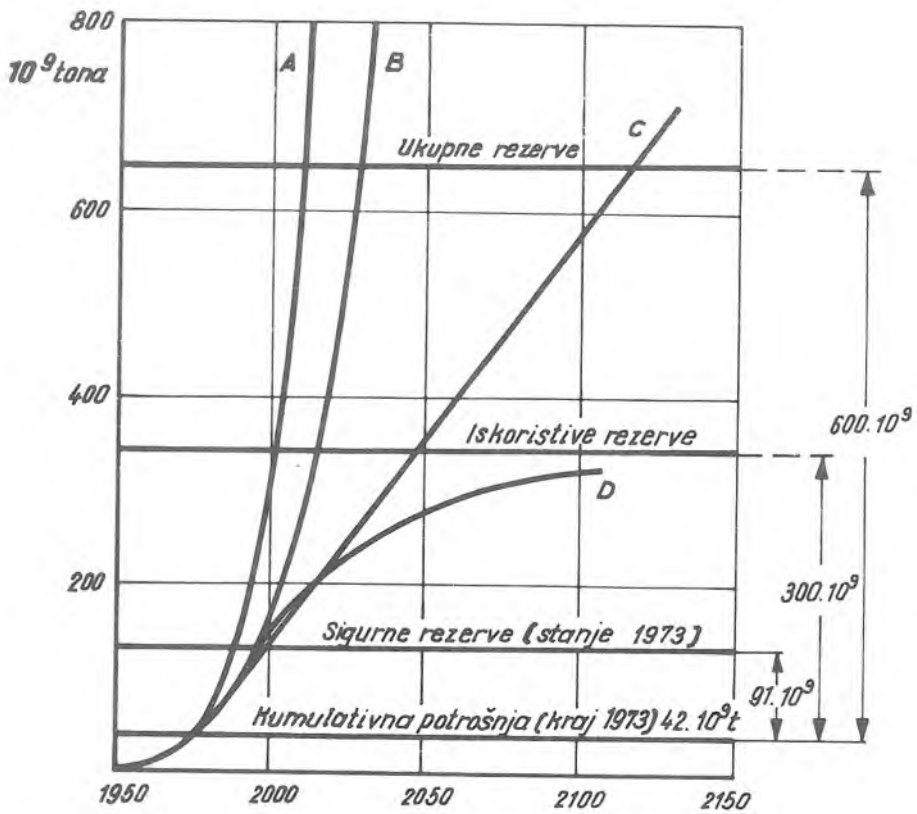
Sl. 3.

Razvoj proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama u svijetu.



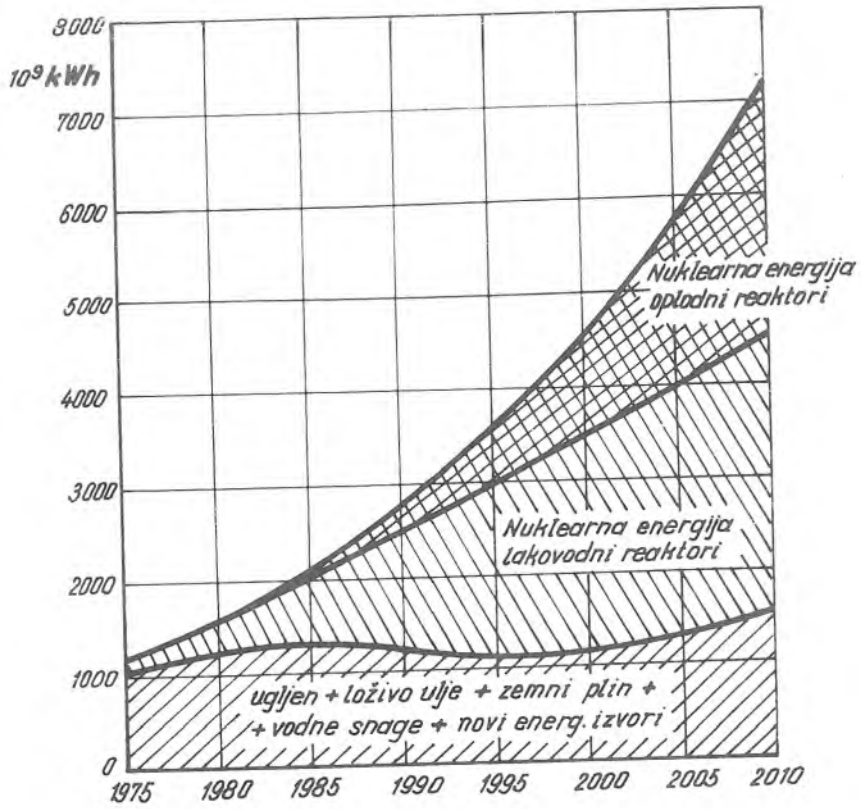
Sl. 4.

Struktura potrošnje primarnih oblika energije u svijetu



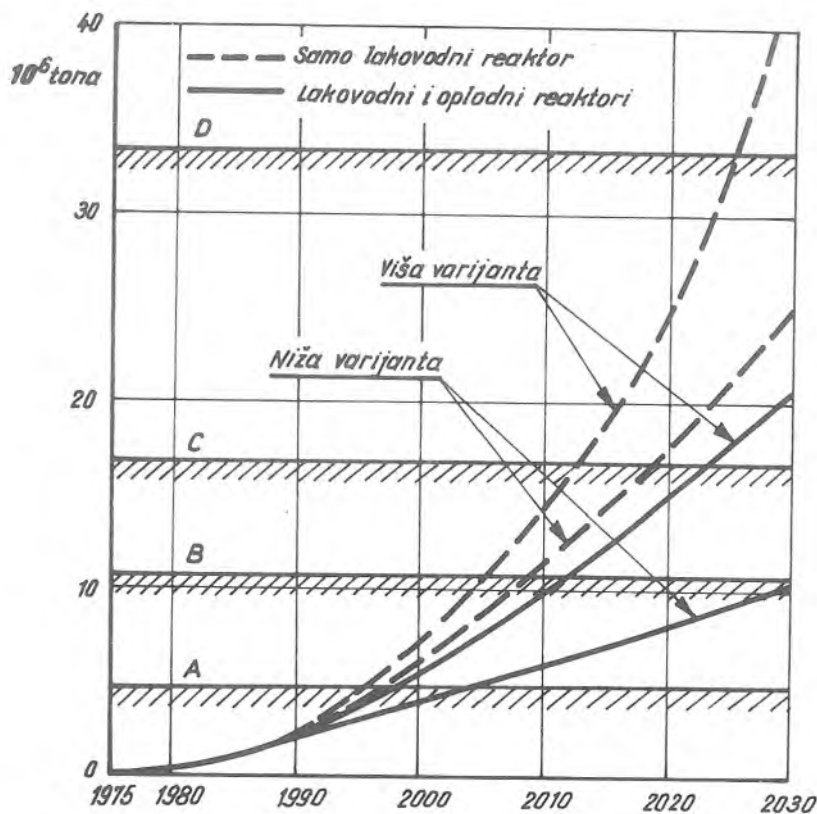
Sl. 5.

kumulativna potrošnja sirove nafte uz različite pretpostavke razvoja potrošnje (A - današnja stopa porasta potrošnje, B - smanjena stopa porasta potrošnje, C - konstantna potrošnja nakon 1980. godine, D - smanjenje potrošnje nakon 2000. god.)



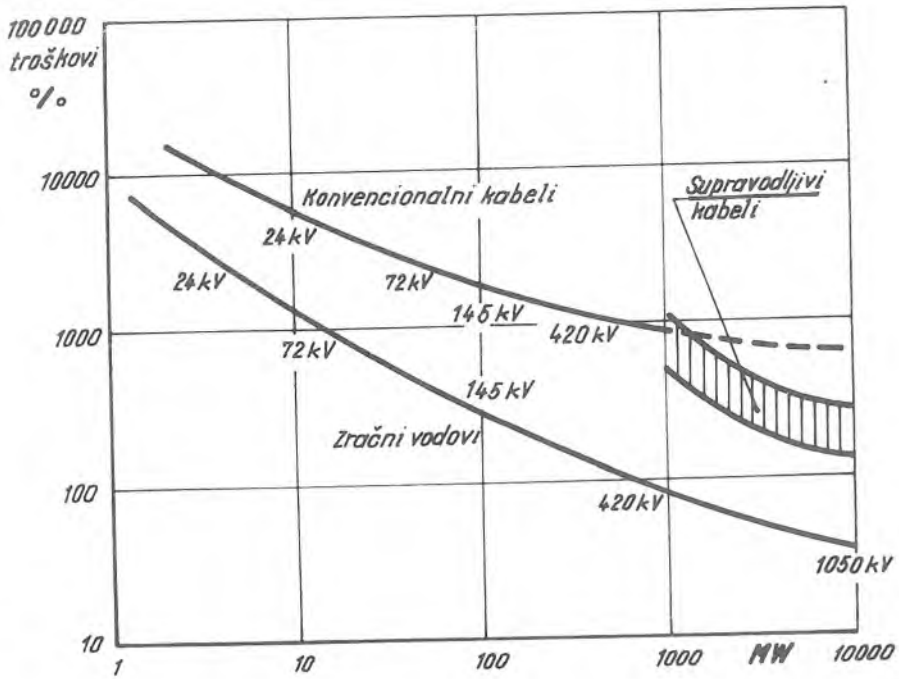
Sl. 6.

*Predviđanja razvoja proizvodnje električne
energije u 9 zemalja zap. Europe (OECD)*



Sl. 7.

Potrebne kumulativne količine urana za razvoj korištenja nuklearne energije prema sl. 4 (bez SSSR-a i Kine). A: sigurne rezerve do 66 \$/kg, B: A + vjerojatne rezerve, C: A + B + očekivane rezerve, D: A + B + C + rezerve u siromašnim rudačama



Sl. 8.

Usporedba troškova prijenosa kabelima i zračnim vodovima

Milan Savić
Ratko Kovačić
Nikola Rajković
Elektrotehnički fakultet, Beograd

TESLIN TRANSFORMATOR I JEDNA MOGUĆNOST NJEGOVE PRIMENE

U ovom radu je opisana jedna konstrukcija Teslinog transformatora za proizvođenje visokih napona visoke učestanosti. U radu su opisani neki rezultati njegovog ispitivanja. To su: oblik napona na sekundarnom namotaju za različite vrste sekundarnog opterećenja, uticaj kondenzatora u primarnom kolu na učestanost, uticaj objekta ispitivanja u sekundarnom kolu na učestanost, itd. Osim toga, prikazana je mogućnost primene Teslinog transformatora za ispitivanje izolatorskih članaka visokim visokofrekventnim naponom i objašnjena potreba za takvim ispitivanjem.

TESLA'S TRANSFORMER AND ONE OF ITS POTENTIAL APPLICATIONS

One of Tesla's transformer designs was intended for the production of high frequency voltages. Some of its features have been tested, e.g., voltage form on the secondary winding for different kinds of secondary loads, the influence of the capacitor in the primary circuit on frequency, the influence of the transformer on frequency when the former is incorporated into a secondary circuit, etc. Moreover, Tesla's transformer can also be applied to advantage for testing insulator units by high frequency voltage.

1. UVOD

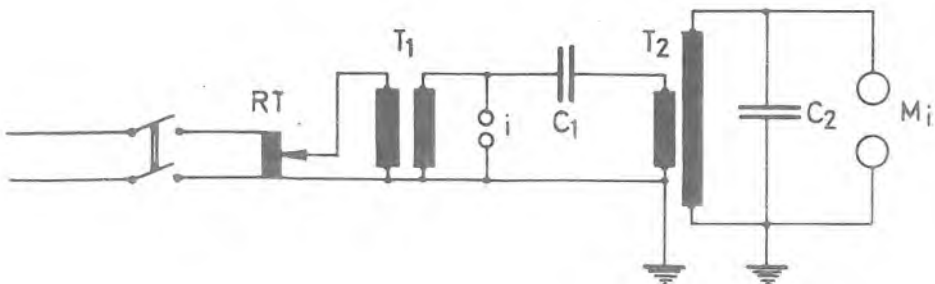
Između niza drugih pronalazaka Nikola Tesla je izumeo uređaj pomoću koga se može proizvoditi vrlo visoki visokofrekventni napon. Ovaj uređaj je dobio ime po svom izumitelju "Teslin transformator". Danas su visokofrekventne struje, koje se mogu dobiti pomoću Teslinog transformatora, našle primenu u terapijske svrhe u medicini.

U ovom radu je prikazana još jedna mogućnost primene Teslinog transformatora za ispitivanje izolatora i drugih elemenata elektroenergetskih postrojenja i mreža. Poznato je da se pri nekim režimima u elektroenergetskim mrežama, prilikom pojedinih kvarova, mogu pojaviti prelazni procesi, koji se odlikuju visokim naponima, a ti mogu biti nekoliko puta veći od nominalnog napona, a čija učestanost može biti mnogo viša od industrijske učestanosti. Teslin transformator može da posluži za ispitivanje izolatora u uslovima nenormalnih pogona pri pojavi visokofrekventnih visokih napona u sistemu.

2. OPIS UREĐAJA

Teslin transformator se sastoji iz dva induktivno spregnuta oscilatorna kola. Induktivna sprega oscilatornih kola se ostvaruje preko vazdušnog transformatora, čiji sekundarni namotaj ima daleko veći broj navojaka nego primarni. Ako se na neki način izazove oscilovanje elektromagnetne energije u primarnom kolu, javiće se oscilacije i u sekundarnom kolu. Pri tome se na sekundarnom namotaju vazdušnog transformatora može pojaviti vrlo visoki napon u zavisnosti od odnosa preobražaja transformatora.

Principijelna šema Teslinog transformatora, čija se konstrukcija opisuje u ovom radu, prikazana je na sl. 1.



Sl. 1.

gde je: RT regulacioni transformator pomoću koga se reguliše napon napajanja

T_1 transformator odnosa preobražaja 0,22/10 kV/kV

i višestruka iskrišta čija se rastojanja mogu menjati

C_1 kondenzatori priključeni u primarnom kolu. Broj priključnih kondenzatora se može menjati, čime se menja sopstvena učestanost primarnog kola.

T_2 vazdušni transformator pomoću koga se ostvaruje sprežanje primarnog i sekundarnog oscilatornog kola.

C_2 kapacitet objekta koji se priključuje u sekundarnom kolu.

Mi merno sferno iskrište pomoću koga se može meriti visokofrekventni napon u sekundarnom kolu.

U tačnoj ekvivalentnoj šemi Teslinog transformatora treba voditi računa da su namotaji vazdušnog transformatora i kapacitivno spregnuti, što dovodi prenošenja energije sa primara na sekundar ne samo induktivno, već i kapacitivno.

Prilikom odredjivanja sopstvenih učestanosti uređaja treba voditi računa ne samo o kapacitetima kondenzatora C_1 i C_2 koji su označeni na sl. 1, već i o parazitnim kapacitetima koji se javljaju izmedju navojaka istog namotaja kao i izmedju navojaka namotaja primara i sekundara i izmedju navojaka jednog namotaja i zemlje. Zbog toga je tačna analiza prelaznih stanja koja se događaju prilikom rada Teslinog transformatora vrlo složena.

3. PRINCIP RADA

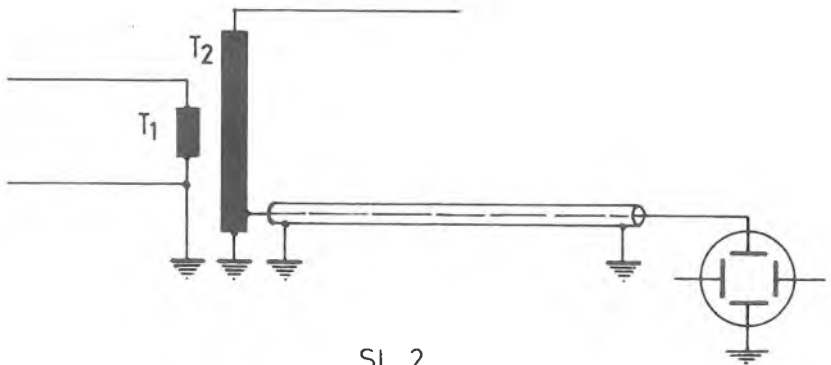
Ako su iskrišta "i" na dovoljnom rastojanju da se na njima ne javlja preskok, napon na sekundarnom namotaju transformatora T_1 je industrijske učestanosti. Ako se rastojanje izmedju elektroda iskrišta smanji, dolazi do preskoka na iskrištu. Posle preskoka kondenzator kapaciteta C_1 i primarni namotaj transformatora T_2 čine primarno oscilatorno kolo. Transformator T_1 je prespojen električnim lukom na iskrištu "i". Zbog nagle promene režima pri preskoku dolazi do oscilacija u primarnom kolu, što izaziva prelazni režim u sekundarnom kolu i pojavu visokih napona na sekundarnom namotaju vazdušnog transformatora T_2 .

Posle izvesnog vremena se oscilacije u kolu prigušuju, električni luk na iskrištu "i" se gasi i uspostavlja se režim kao pre preskoka. Kada se ponovo napon na iskrištu "i" poveća iznad

preskočnog napona, ponovo se javlja preskok koji izaziva prelazni proces.

Pobudjivanje Teslinog transformatora se vrši u svakoj poluperiodi napona idustrijske učestanosti na transformatoru T_1 , kada napon na iskrištu "i" postaje veći od preskočnog napona, što izaziva pojavu prelaznog procesa usled preskoka.

Posmatranje napona u sekundarnom kolu Teslinog transformatora može se vršiti pomoću osciloskopa priključivanjem koaksijalnog kabla između poslednjeg navojka sekundarnog namotaja vazdušnog transformatora i osciloskopa, kao što je to prikazano na sl. 2.



Sl. 2.

Budući da se dovodjenje napona na osciloskop vrši pomoću relativno kratkog koaksijalnog kabla, nije potrebno priključivanje završnih otpora zbog sprečavanja refleksija od krajeva kabla.

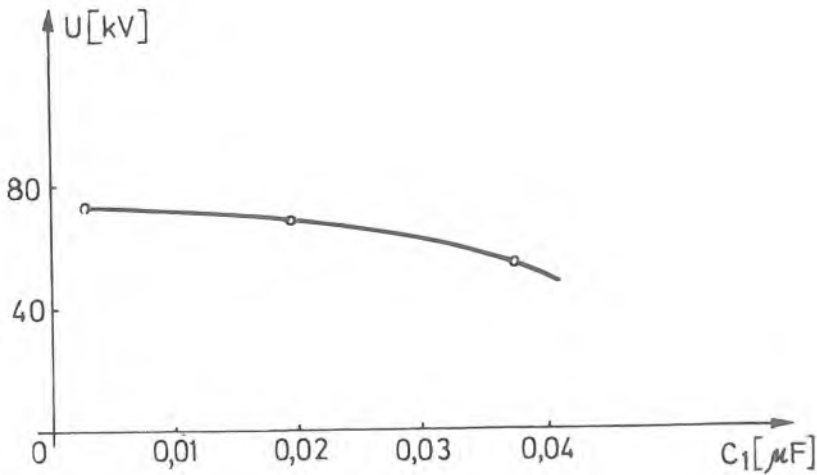
Za jedan stalan položaj obe namotaja vazdušnog transformatora T_2 ne menja se međusobna induktivnost između namotaja. U tom slučaju se može eksperimentalno odrediti odnos deljenja ukupnog napona, koji vlada na celokupnom namotaju, i napona na zadnjem navojku kod uzemljenog kraja sekundarnog namotaja vazdušnog transformatora. Kada se jednom utvrdi odnos deljenja eksperimentalnim putem, posmatranje i merenje napona može se vršiti pomoću osciloskopa, a sekundarni namotaj transformatora T_2 uzima ulogu delila napona.

4. NEKE KARAKTERISTIKE OPISANOG TESLINOG TRANSFORMATORA

U ovom radu su date samo neke najosnovnije karakteristike opisane konstrukcije Teslinog transformatora, čije je poznavanje potrebno da bi se transformator mogao uspešno koristiti za ispitivanje elektroenergetske opreme visokim visokofrekventnim naponom.

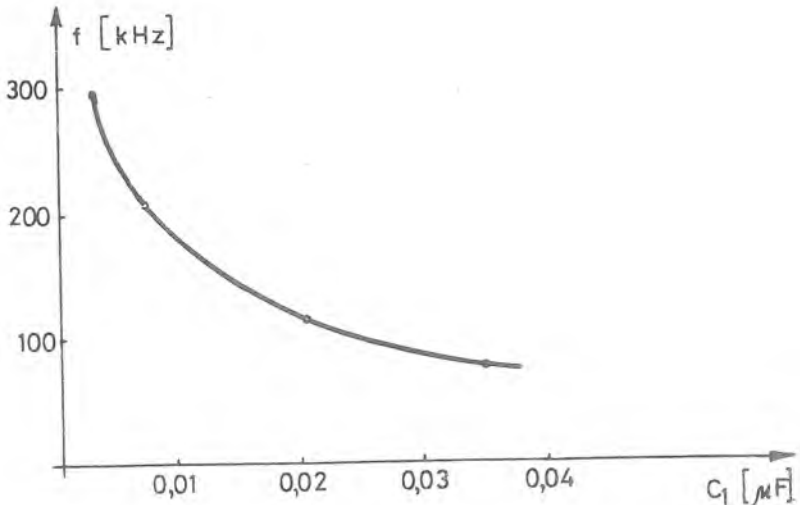
Kako je kapacitet objekta ispitivanja C_2 ujedno i kapacitet sekundarnog kola, karakteristike uređaja bitno zavise od osobina priključenog objekta.

Važne karakteristike Teslinog transformatora su uticaj kapaciteta kondenzatora priključenih u primarnom kolu na visinu napona i na učestanost prelaznog procesa. Na sl. 3 je prikazana eksperimentalno dobijena kriva napona na sekundarnom namotaju transformatora T_2 u funkciji kapaciteta priključenih kondenzatora C_1 u primarnom kolu, kada je u sekundarnom kolu priključen kapacitet $C_2 = 100 \text{ pF}$.



Sl. 3.

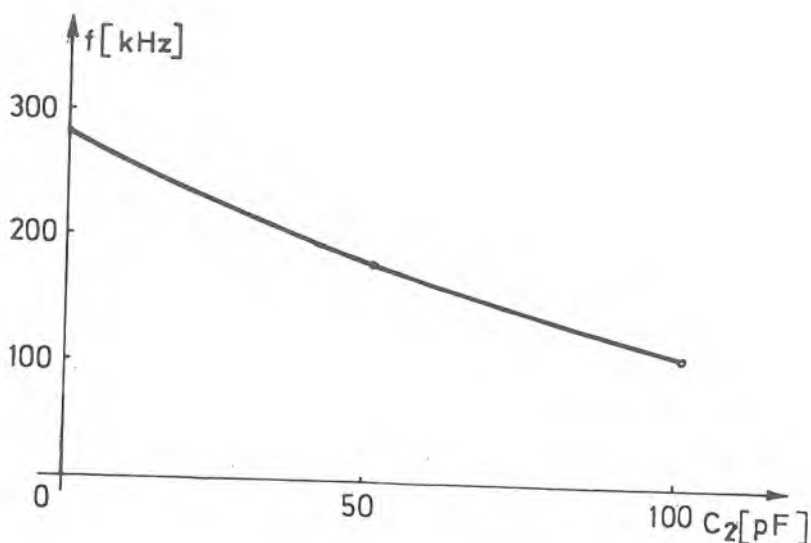
Na sl. 4 prikazan je uticaj priključenih kondenzatora u primarnom kolu na učestanost prelaznog procesa pri otvorenom sekundarnom kolu.



Visina napona, koja se dobija na sekundaru transformatora T_2 , zavisi najviše od rastojanja između elektroda iskrišta "i". Regulisanje visine napona vrši se ručnim pomeranjem iskrišta preko sistema poluga.

Na visinu napona, koji daje Teslin transformator, uopšte se ne može uticati promenom napona napajanja uredjaja pomoću regulacionog transformatora RT. Međutim, promena napona napajanja može da utiče na stabilniji rad uredjaja usled pravilnijeg paljenja i gašenja električnog luka između elektroda iskrišta.

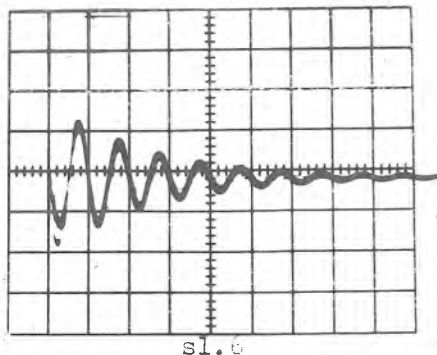
Na sl. 5 prikazana je kriva koja pokazuje promenu učestalosti napona na sekundarnom namotaju vazdušnog transformatora T_2 u funkciji kapaciteta priključenog objekta C_2 u sekundarnom kolu uredjaja.



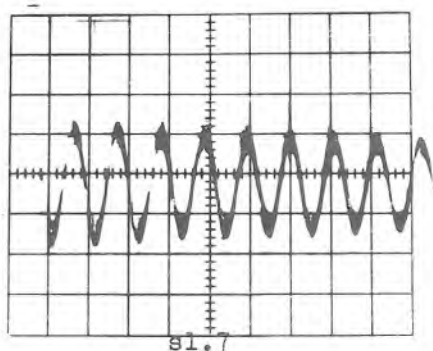
Sl. 5.

Kriva na sl. 5 odnosi se na minimalnu vrednost priključenog kapaciteta C_1 u primarnom kolu. Sa krive sa sl. 5. može se uočiti da objekat ispitivanja ima vrlo veliki uticaj na učestanost napona koja se dobija pomoću Teslinog transformatora.

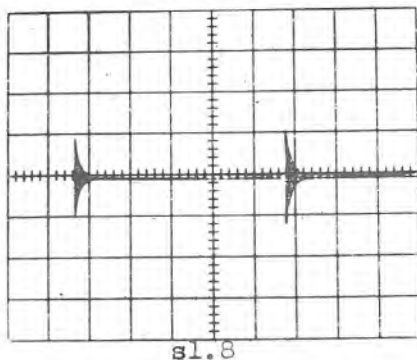
Na sl. 6 prikazan je vremenski tok napona na sekundarnom namotaju vazdušnog transformatora T_2 snimljen pomoću osciloskopa za slučaj minimalnog kapaciteta C_1 priključenog u primarnom kolu i kapaciteta priključenog u sekundarnom kolu $C_2 = 450 \text{ pF}$.



Na sl. 7 prikazan je oblik napona u slučaju kada je u sekundarnom kolu priključen jedan izolatorski članak čiji je kapacitet oko 50pF.



Na sl. 8 je snimljen oblik napona u vremenskom intervalu od $t=0,02\text{sec}$. Zbog vrlo visoke učestanosti prelaznog procesa ne mogu se uočiti oscilacije napona, već samo obvojnica krive napona koja pokazuje vrlo izraženo prigušivanje prelaznog procesa. Sa slike se može uočiti da vremenski interval između dva pobudjivanja oscilacija u Teslinom transformatoru iznosi polovinu periode napona kojim se napaja uređaj.



5. PRIMENA TESLINOG TRANSFORMATORA ZA ISPITIVANJE IZOLATORA ZA NADZEMNE VODOVE

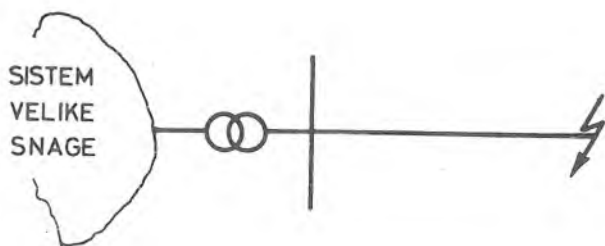
Prilikom nekih kvarova i pri naglim promenama režima u elektroenergetskim mrežama se mogu pojaviti elektromagnetski

prelazni procesi, koji se odlikuju pojavom napona, koji mogu imati znatno višu učestanost od nominalne učestanosti izvora. Učestanost prelaznog procesa zavisi od konfiguracije i parametara mreže i može se kretati u vrlo širokim granicama. Odlika ovih prelaznih procesa je ta da se vrlo brzo prigušuju.

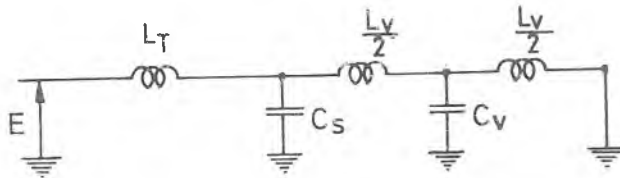
U odredjenim konfiguracijama elektroenergetskih mreža može se dogoditi da se pri kvaru uspostavlja električni luk koji slobodno gori u vazduhu izmedju faznog provodnika i zemlje. Pri prolazu struje kroz nulu može se dogoditi da se električni luk ugasi, a kad napon poraste iznad podnosivog napona, ponovo dolazi do uspostavljanja luka, što dovodi do ponovnog pobudjivanja prelaznog procesa.

Ako se intenzitet električne struje na mestu kvara kreće u odredjenim granicama, intermitentno gorenje električnog luka može trajati vrlo dugo, proizvodeći vrlo visoke napone pri prelaznom procesu koji se odlikuje visokom učestanošću. Oblik napona pri ovoj pojavi sličan je obliku napona, koji se dobija pri radu Teslinog transformatora.

Da bi se ilustrovala sličnost napona, koja se dobija pri nekim kvarovima u elektroenergetskim mrežama i napona koji se dobija pomoću Teslinog transformatora, izvršen je proračun prelaznog procesa pri kratkom spoju jedne faze sa zemljom kratkog dalekovoda dužine 10km nominalnog napona 35kV. Proračun je izvršen uprošćenim načinom, zanemarujući međufazne uticaje i zamenjujući vod skoncentrisanim kapacitetom i induktivitetom u uprošćenoj T šemi. Šema posmatranog sistema prikazana je na sl. 9, a zamenska šema, po kojoj je izvršen proračun, na sl. 10.



Sl. 9



Sl. 10

Oznake na sl. 10 imaju sledeće značenje:

E - elektromotorna sila kojom se ekvivalentira sistem velike snage

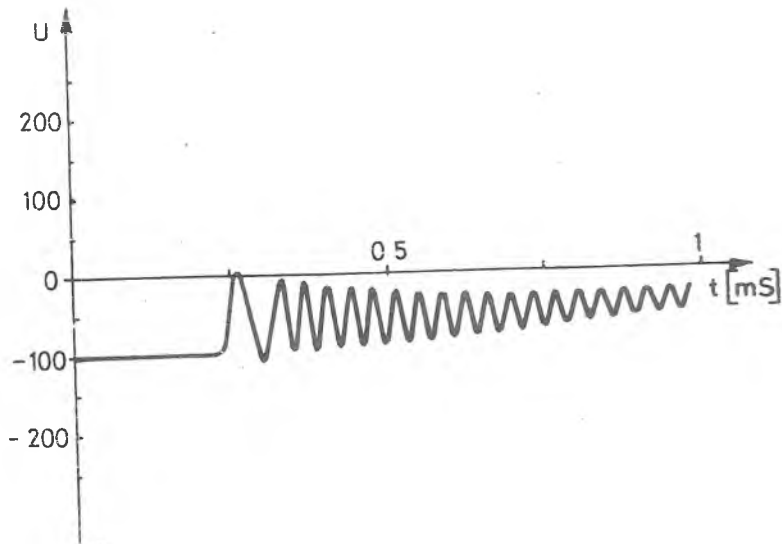
L_T - ekvivalentna induktivnost sistema i induktivnost rasipanja transformatora

C_S - skoncentrisana kapacitivnost sabirnica postrojenja

L_v - induktivnost vazdušnog voda

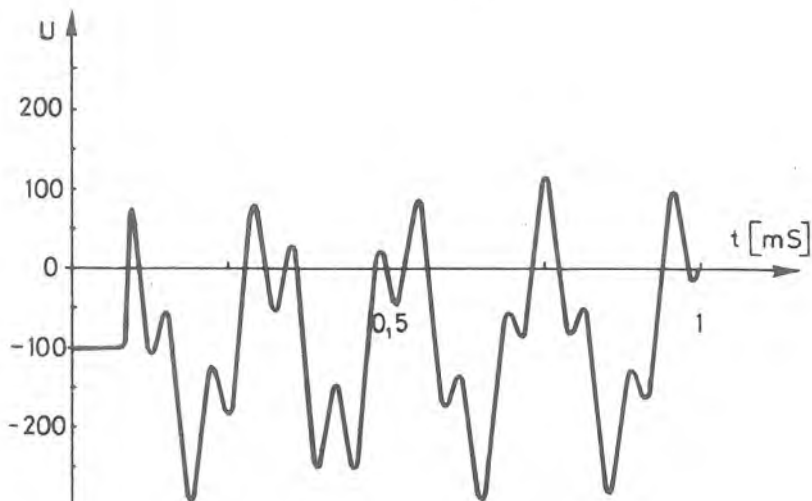
C_v - kapacitivnost vazdušnog voda

Na sl. 11 prikazan je napon na sabirnicama postrojenja pri kratkom spoju koji nastupa u trenutku kada je napon na vodu maksimalan. Na sabirnicama i na vodu se javljaju visokofrekventne oscilacije koje se postepeno prigušuju usled gubitaka u kolu.



sl. 11

Ako bi došlo do isključenja kratkog spoja pri prvom prolazu struje kroz nulu, napon na vodu bi imao oblik kao na sl. 12. U ovom slučaju javlja se i znatno povećanje napona u odnosu na nominalni napon mreže, a napon pri prelaznom procesu odlikuje se pojavom visokih učestanosti. Naponi su na slikama 11 i 12 izraženi u procentima od nominalnog napona mreže.



Sl. 12

Na osnovu gornjih primera može se zaključiti da se pri nekim poremećajima u elektroenergetskim mrežama mogu pojaviti visoki naponi povišene frekvence koje izolacija treba da podnese.

Zbog pojave povišenih napona visoke učestanosti pored uobičajenih ispitivanja izolatora (naizmeničnim naponom idustrijske frekvence i udarnim naponom) poželina su i ispitivanja izolatora visokim naponom visoke učestanosti. U tu svrhu može vrlo povoljno da posluži Teslin transformator.

Izvršena su probna ispitivanja na člankastim porculanskim izolatorima, od kojih su neki bili snabdeveni metalnom kanom i tučkom, dok su neki izolatori bili bez montiranih metalnih delova. Prilikom ispitivanja javljale su se vrlo izražene puzajuće struje po površini izolatora, koje su bile najjače oko elektrode, na koju se dovodio napon. Prilikom probnog ispitivanja svi izolatori su uspešno izdržali dovedeni napon. Osciloskopski snimci (sl.7) pokazuju da se prilikom priključenja jednog izolatoraskog članka pojavljuje viskokofrekventni napon vrlo sličan naponu pri prelaznom procesu u mreži, učestanosti od oko 200kHz.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata snimanja oblika napona koji daje Teslin transformator i oblika napona koji se može pojaviti u elektroenergetskoj mreži pri nekim poremećajima, zaključeno je da se Teslin transformator može uspešno koristiti za ispitivanje izolacije vazdušnih vodova visokofrekventnim naponom.

7. LITERATURA

1. R. Kovačić: "Projekat i izrada Teslinog transformatora" Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd 1973g.
2. M. Savić: "Kombinovana metoda proračuna komutacionih prenapona u mrežama sa skoncentrisanim i raspodeljenim kapacitetima". Publikacije Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, serije "Energetika" No. 55, Oktobar 1975.



DANIJEL SMILJANIĆ, dipl.ing.
Poduzeće "Rade Končar"
OOUR Elektrotehnički institut
Zagreb, Baštijanova bb

mr STJEPAN NOVOSEL, dipl.ing.
Poduzeće "Rade Končar"
OOUR Tvornica generatora
Zagreb, Fallerovo šetalište 22

OPREMA ZA NUKLEARNA ISTRAŽIVANJA

U Poduzeću "Rade Končar" proizvedeno je ukupno oko 1700 tona elektromagneta za vođenje i transport ubrzanih nabijenih čestica. Korisnici tih magneta su CERN - Švicarska, DESY - Zap. Njemačka, Laboratori Nazionali di Frascati - Italija, Rutherford High Energy Laboratory - Engleska, Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay - Francuska, Institut "Rudjer Bošković" - Jugoslavija.

Pri izradi magneta korištena su specifična tehnička rješenja uz primjenu novih materijala i suvremene tehnologije.

EQUIPMENT FOR NUCLEAR RESEARCH

The "Rade Končar" Works has thus far manufactured about 1,700 tons of electromagnets for the guiding and transport of accelerated charged particles. The users of these electromagnets include CERN, Switzerland; DESY, Federal Republic of Germany; Laboratori Nazionali di Frascati, Italy; Rutherford High Energy Laboratory, United Kingdom; Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, France; and the Rudjer Bošković Institute, Yugoslavia.

Advanced designs, new materials and technologies were used in magnet manufacture.

1. UVOD

U posljednjih petnaestak godina proizvedeno je u Poduzeću "Rade Končar" u Zagrebu, a u suradnji s Elektrotehničkim institutom više različitih elektromagneta za vodjenje i transport snopa nabijenih čestica. Ovi magneti, bruto težine oko 1700 tona, proizvedeni su za nuklearno istraživačke centre kao: CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucleaire) - Švicarska, DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) - Zapadna Njemačka, Laboratori Nazionali di Frascati - Italija, RHEL (Rutherford High Energy Laboratory) - Engleska, CEN (Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay) - Francuska, Institut "Rudjer Bošković" - Jugoslavija. Među navedenima su i dva kompletna magnetska sistema za akceleratora, i to akumulacioni prsten ADONE za elektrone i sinhrotron SATURNE II, energije 2.7 GeV za Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, koji je upravo u fazi izrade.

2. MAGNETSKI KRUG

Svi elektromagneti, uključujući razne tipove otklonskih magneta, spektrometrijskih magneta, ispitnih magneta, kvadrupola, zakretnih magneta, bilo za akceleratora ili za transport primarnog ili sekundarnog snopa nabijenih čestica, imaju magnetski krug načinjen od niskougljičnog magnetskog čelika lameliranog ili masivnog. Osnovne karakteristike tog čelika su niska koercitivna sila i visoka indukcija zasićenja. Da bi se osigurala homogenost materijala, kod magneta s masivnim magnetskim krugom češće se koriste valjani ili kovani komadi, a samo kod izrazito velikih magneta koriste se odljevci. Kod lameliranih izvedbi homogenost se postiže miješanjem limova dobivenih od različitih šarži tako da se mjeri koercitivna sila uzoraka iz pojedinih šarži i zatim se limovi svrstavaju prema dobivenim rezultatima u više skupina. Proporcionalno količini limova u pojedinoj skupini određuje se broj limova iz svake skupine koji se zatim ciklički redaju.

Da bi se zadržala zahtjevana jednodobnost magnetskog polja, ili jednodobnost gradijenta polja u zračnom rasporu između polova magneta, potrebno je održavati vrlo stroge tolerancije kod mehaničke obrade pojedinih dijelova magneta i kasnije kod montaže.

Na primjer, površine polnih profila najčešće ne smiju odstupati za više od ± 0.05 mm od teoretske vrijednosti. Kod lameliranih izvedbi zahtijeva se točnost štanjanja limova u granicama ± 0.03 mm, a ponekad i ± 0.02 mm. Tolerancije kod montaže najčešće su reda ± 0.1 mm, i nakon nekoliko rastavljanja i ponovnih sklapanja magneta, te točnosti moraju biti zadržane.

3. UZBUDNI NAMOT

Vodiči za uzbudne namote izradjeni su gotovo uvijek iz elektrolitskog bakra najčešće pravokutnog presjeka s centrično smještenom rupom za prisilno hladjenje namota vodom. Mjesta spajanja vodiča su potpuno nepropusna, ne smiju povećati električki otpor niti otežati protok rashladne vode. Duljine pojedinih rashladnih krugova odabrane su tako da porast temperature namota ne može ni u kom slučaju oštetiti izolaciju namota. Tako uzbudni namot jedinog magneta čini jedan strujni krug i više usporednih vodnih krugova.

Vodiči su kod velike većine magneta izolirani vrpčama od samo staklenih niti ili staklenih niti s umetnutim tinjcem. Staklene niti u vrpčama često su specijalno tretirane da bi se osiguralo što bolje prijanjanje epoksidne smole uz njih. Spomenute vrpce su ili predimpregnirane epoksidnom smolom ili se impregnacija provodi kasnije u vakuumu. Spomenuta izolacija je vrlo čvrsta i stabilna i može idržati mehanička naprezanja, koja nastaju zbog pulzirajućeg napajanja magneta, kao i termička naprezanja zbog visokih gustoća struje u vodičima i prisilnog hladjenja namota vodom.

Budući da se namoti nalaze u zoni ionizirajućeg zračenja, koje nastaje kao posljedica nepoželjnog raspršenja snopa, izolacija mora biti otporna na zračenje. Pritom se najčešće zahtijeva da izolacija izdrži za vrijeme svoje životne dobi apsorbiranu dozu od ukupno 10^9 rada bez ikakvih oštećenja, a da pri dozi od 5×10^9 rada može izgubiti 50% od svojih nominalnih mehaničkih svojstava.

Da bi se osigurala kvalitetna izrada uzbudnih namota, oni se tokom proizvodnje i po dovršenju podvrgavaju vrlo strogim ispitivanjima. Naročito se ispituje nepropusnost spojnih mjesta vodiča i električka svojstva izolacije.

4. KVADROPOLI

Od svih vrsta magneta do sada je izradjeno u Poduzeću "Rade Končar" najviše kvadropola. Tu su obuhvaćeni razni tipovi s magnetskim krugom masivne ili lamelirane izvedbe te vodičima uzbudnih namota iz punog ili šupljeg bakra. Posebno se ističu kvadropoli masivne izvedbe dugi 2 m, izradjeni za CERN, gdje se na dužini od 2 m trebalo održati vrlo stroge zahtjeve na mehaničku obradu i montažu magnetskog kruga. Izdvajaju se takodjer kvadropoli kod kojih je magnetski krug načinjen tako da se tokovi zatvaraju u obliku broja osam. Ti se kvadropoli ističu malom širinom, pa mogu biti stavljeni vrlo blizu izvoru čestica, čime se smanjuje njihovo rasipanje. Takovi kvadropoli izradjivani su za CERN i RHEL.

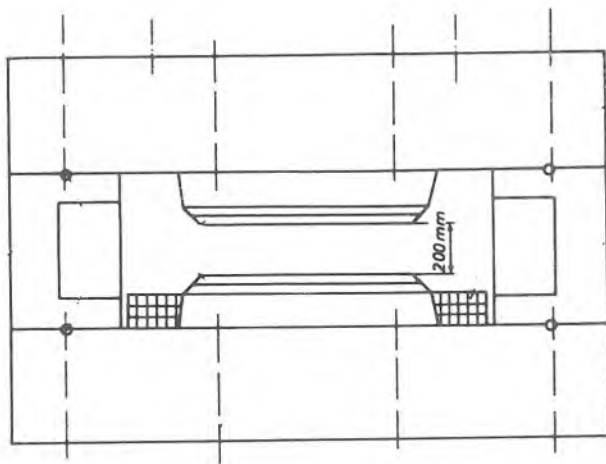
Kvadropoli s lameliranim magnetskim krugovima izradjeni su od limova debljine 2 mm, 1.5 mm i 0.5 mm.

5. ISPITNI MAGNET

Ovaj magnet, izradjen za CERN, proizvodi vertikalno magnetsko polje indukcije 1.8 T u zračnom rasporu od 200 mm. Jaram magneta je pravokutan, a polovi kružni, promjera 840 mm pri vrhu (slika 1). Na polovima magneta su posebno montirani polni nastavci koji se mogu bez poteškoća mijenjati, a njihovim oblikom definirana je konfiguracija polja u zračnom rasporu. Magnet je namijenjen za ispitivanje ponašanja opreme u magnetskom polju. Ta oprema se kasnije ugrađuje u druge magnete.

6. AKUMULACIONI PRSTEN "ADONE"

Prije nešto manje od 10 godina dovršen je u Poduzeću "Rade Končar" magnetski sistem akumulacionog prstena ADONE za elektrone i pozitrone energije 1.5 GeV (slika 2). To je stroj s jakim fokusiranjem i separatnim funkcioniranjem, a sastoji se od 12 dipola zakrivljenog oblika čiji kut zakretanja iznosi 30° i 48 fokusirajućih i defokusirajućih kvadropola, smještenih po dva para između svaka dva dipola.

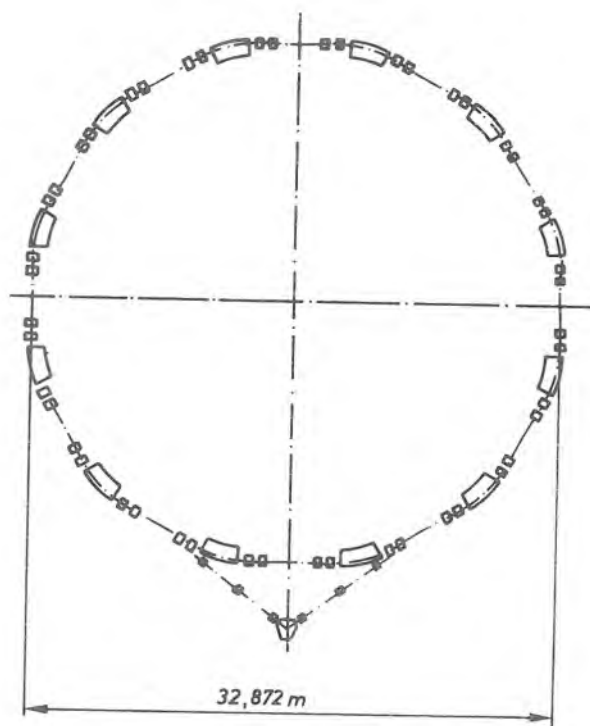


Slika 1 Ispitni magnet, ukupne mase oko 30 tona, izradjen za CERN, Švicarska

Magnetski krug dipola je C tipa (slika 3), zatvoren s unutarnje strane približno kružne putanje čestica. Izradjen je od hladno valjanih nisko ugljičnih limova debljine 2 mm. Limovi su međusobno električni izolirani i slijepljeni u blokove. Pojedini dipol dužine oko 2.5 m, sastavljen je od sedam takovih blokova. Nominalna indukcija u zračnom rasporu je 1 T, a u jarmu 1.4 T. Polje u zračnom rasporu nije homogeno, jer su visine zračnog raspora u presjeku okomitom na putanju 101.8 mm odnosno 98.2 mm.

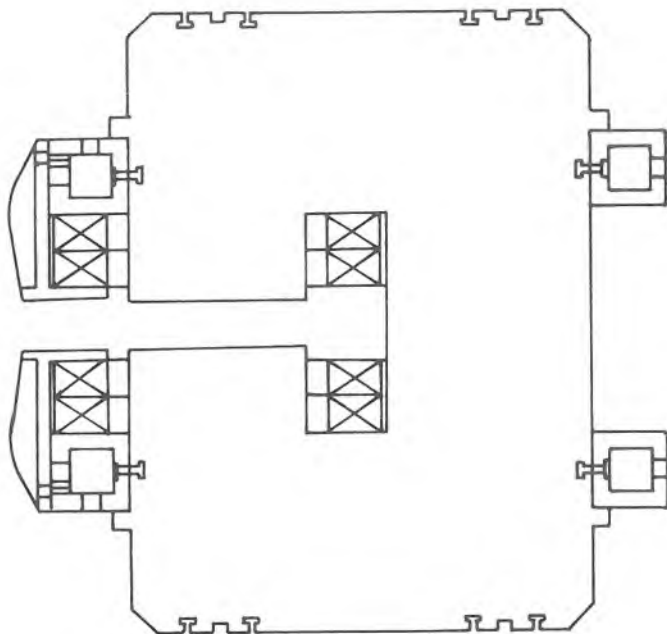
Kvadrupoli su izradjeni od istovrsnih limova, takodjer međusobno izoliranih i slijepljenih. Kao izolacija, a istovremeno i ljepilo korišten je papir predimpregniran u epoksidnoj smoli (slika 4).

Uzbudni namot i dipola i kvadrupola izradjeni su iz elektrolitskog bakra kvadratnog presjeka s centrično smještenom rupom za prisilno hladjenje.

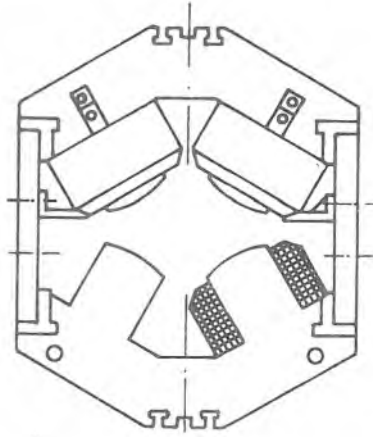


Slika 2. Magnetski sistem akumulacionog prstena ADONE za elektrone i pozitrone, izradjen za Laboratori Nazionali di Frascati Italija

Vodiči uzbudnog namota izolirani su međusobno i prema masi trakom na bazi stakla i tinjca i impregnirani epoksidnom smolom. Struja napajanja je oko 1000 A.



Slika 3 Presjek dipola akumulacionog prstena
ADONE



Slika 4. Presjek kvadrupola akumulacionog prstena ADONE

7. SPEKTROMETRIJSKI MAGNETI

Za istraživanja na području srednjih energija u CEN-u izradjeni su tokom 1973 godine dva elektromagneta za spektrometriju sekundarnih čestica energije do 1 GeV. Elektromagneti imaju u zračnom rasporu visine 200 mm homogeno polje. Maksimalna indukcija je 1.5 T. Magnetski kutevi zakretanja iznose 60.5° i 40° . Uzbudni namoti su plosnati s vodičima iz elektrolitskog bakra i centričnom rupom za hladjenje. Namot je izoliran na bazi stakla i tinjca i impregniran epoksidnoj smoli. Struja napajanja je 2000 A.

Magnetski krug je izradjen iz niskougličnog kovanog čelika, a naročita pažnja je posvećena točnosti njegove izrade i montaže, budući da se radi o velikim i teškim komadima. Svaki od magneta je ukupne težine oko 50 tona.

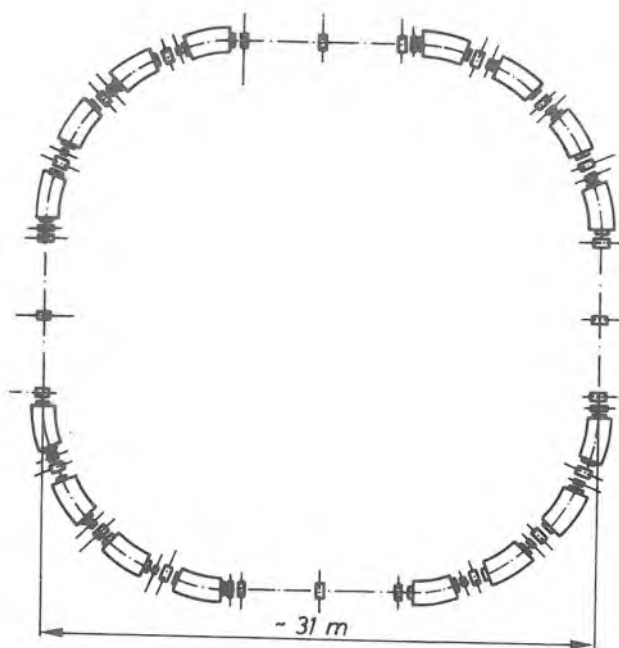
8. PROTONSKI SINHROTRON "SATURNE II"

Još od 1969. godine postoji plan prema kojem je za potrebe razvoja nuklearne fizike u Francuskoj nužno do 1980. godine sagraditi dva akceleratora:

- jedan bi proizvodio teške ione energije reda veličine 10 MeV/nukleon. Početkom ove godine formirane su grupe koje trebaju realizirati ovaj projekt, koji će se pod nazivom GANIL graditi u Caen-u.
- drugi bi proizvodio protone u području 0.5 do 2 GeV i radjen na novim koncepcijama, trebao bi zadovoljiti potrebe istraživanja na području srednjih energija.

Postojeći protonski sinhrotron SATURNE, gradjen sa slabim fokusiranjem, ne može zadovoljiti postavljene zahtjeve, naročito što se tiče kvalitete dobivenog snopa protona. No modernizacija tog stroja može dovesti do toga da se dobiju željena svojstva uz manje troškove, s tim da se koriste postojeće zgrade, uređaji za napajanje magneta, injektor (linak 20 MeV) i dio druge postojeće opreme. Ta ideja o modernizaciji sinhrotrona SATURNE dovela je u 1973. god. do stvaranja projekta SATURNE II, gdje se u prvoj fazi modernizacije izrađuje novi magnetski sistem, i to će biti sinhrotron s jakim fokusiranjem, koji može proizvesti snop intenziteta 10^{12} protona / sek, energije 0.5 do 2.7 GeV s velikom sigurnošću u eksploataciji. Magnetski sistem akceleratora, čija je proizvodnja u toku u Tvornici generatora Poduzeća "Rade Končar", sastoji se od 16 dipola i 24 kvadrupola (slika 5). Zbog relativno malog promjera stroja (31 m) nije moguće koristiti ravne dipole, što bi pojednostavnilo njihovu proizvodnju, već zakrivljene, s kutevima zakretanja od 22.5° po dipolu (slika 6). Dipoli su H tipa sa zračnim rasporom visine 140 mm, dužine oko 2.5 m i maksimalne indukcije 1.95 T. Struja napajanja je pulzirajuća, trapeznog oblika, maksimalnog iznosa 4044 A.

Uz svaki dipol na zajedničko postolje postavljen je i po jedan kvadrupol koji je električki vezan u seriju s dipolom. Magnetski krug i dipola i kvadrupola načinjeni su od istovrsnih niskougljičnih, hladnovaljanih limova debljine 1.5 mm koercitivne sile ispod 48 A/m i indukcije zasićenja iznad 2T. Limovi jarma dipola su međusobno električki izolirani i zatim slijepljeni u blokove. Svaki dipol se sastoji od po pet gornjih i pet donjih blokova. Zahtjev je da izolacija i ljepilo izdrže ukupno apsorbiranu dozu ozračivanja 10^9 rada bez oštećenja.

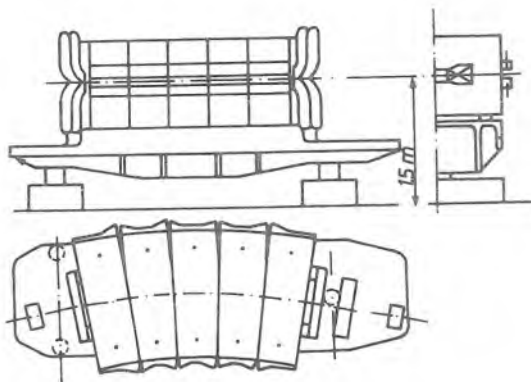


Slika 5. Magnetski sistem protonskog sinhrotrona SATURNEII nalazi se sada u izradi za CEN, Saclay, Francuska

S obzirom na taj zahtjev i ostale zahtjeve, kao izolacija limova odabran je fenolni vodotopivi lak, a kao ljepilo epoksidna smola, u kojoj je punilo kvarcno brašno. Uzorci izoliranih i slijepljenih limova ozračivani su u reaktoru u Saclay i zatim ispitani. Odabrana izolacija i ljepilo su zadovoljili.

Uzbudni namoti izradjeni su iz šupljeg elektrolitskog bakra, za dipole presjeka 23.7×30.3 mm s rupom 12 mm, a za kvadrupole 23×23 mm s istom rupom.

Izolacija vodiča je na bazi stakla i tinjca, i to vrpca predimpregnirana u epoksidnoj smoli, a za izolaciju prema masi koriste se vrpce od samo stakla i stakla i tinjca, koji se impregniraju kasnije u epoksidnoj smoli pod vakuumom. I ovdje su postavljeni isti zahtjevi obzirom na otpornost na ozračivanje, pa su najprije izradjeni uzorci koji su bili ispitani, a tek zatim je prihvaćen predloženi sistem izolacije uzбудnih namota.



Slika 6. Dipol s postoljem za protonski sinhrotron SATURNE II

9. ZAKLJUČAK

Izradom elektromagneta za nuklearne istraživačke centre počelo se u Poduzeću "Rade Končar", uz suradnju Elektrotehničkog instituta, razvijati novo proizvodno područje - nuklearna oprema. Ne postoje još ni kod nas ni u drugim zemljama posebni propisi za izradu opreme za nuklearne istraživačke centre, kao što je slučaj kod izrade opreme za nuklearne elektrane, gdje se primjenjuju posebni propisi, naročito za opremu koja

potpada u područje nuklearne sigurnosti, stoga se kod izrade opreme za nuklearne centre nedostatak posebnih propisa rješava proširenjem specifikacija, u koje se unose svi posebni zahtjevi koje treba zadovoljiti. Na taj način obavezuje se proizvođača, u ovom slučaju elektromagneta, da ispunjavajući dodatne strože zahtjeve, poboljša kvalitetu svojih proizvoda i pri tom unapređuje tehnologiju uz primjenu uvijek novih i suvremenijih materijala. Tako se u Poduzeću "Rade Končar" pri izradi elektromagneta prvi puta počela koristiti za izolaciju namota epoksidna smola, koja se sada primjenjuje u mnogim drugim proizvodima. Za akceleratorne magnete razvijen je i prvi puta primijenjen sistem izolacije otpora na zračenje. Pri izradi magneta koristi se, na primjer, prvi puta i kaptonska folija koja ima izvanredna električka, mehanička i termička svojstva i koja će kasnije vjerojatno imati primjenu u mnogim drugim proizvodima.

Prof. Tugomir Šurina
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Zagreb

TESLIN "VENTILNI VOD" I FLUIDIKA

U prošlom stoljeću pneumatika je zauzela svoje mjesto u pretvorbi, prijenosu i korištenju energije, a u ovom stoljeću se ona koristi i u pretvorbi, prijenosu i obradi informacija. Primjeri zato su pneumatički pretvarači i regulatori u procesnoj regulaciji te sustavi za mjerenje dužina i mala automatika u strojarskoj proizvodnji.

Slijedeći nakon drugog svjetskog rata burni razvoj elektroničkih komponenata i informacijskih sustava, razvila se i nova grana pneumatike, fluidika. Njen razvoj započet 60-ih godina još nije okončan, ali će ona sigurno naći svoje mjesto u strojarskoj proizvodnji.

Već se u početnim koracima fluidike ukazalo na zaboravljeni Teslin patent. Naime, Nikola Tesla je 1916. god. patentirao tzv. "ventilni vod", ustvari fluidičku diodu, slijedeći pronalazak Flemmingove vakuumске diode. Time je on daleko ispred vremena uočio mogućnosti razvoja jednog novog tehničkog područja.

TESLA'S "VALVULAR CONDUIT" AND FLUIDICS

Pneumatics won its place in the conversion, transmission and use of energy as early as the last century. In the present century it is also used in data conversion, transmission and processing: pneumatic process control converters and controllers, low-cost automation and measuring systems are cases in point.

The tempestuous development of electronic components and data systems after World War Two has brought about the growth of its pneumatic counterpart, fluidics. Its development started as late as the sixties, but there is no doubt about its gaining a fitting place in mechanical engineering automation.

The very first steps in fluidics brought up one of Tesla's forgotten patents: in 1916 patented the so-called "valvular conduit", i.e., a fluidic diode, which closely followed Flemming's vacuum diode. Thus Tesla once again perceived the prospects of a new field far ahead of his time.

1. Uvod

Pneumatika kao **fizikalni medij** koristila se široko još u eri mehanizacije u 19. stoljeću. Značajan impuls dala je tunelogradnja jer su tek pneumatičke bušilice riješile problem probijanja velikih alpskih tunela. Nešto kasnije prodrila je pneumatika i u industrijsku proizvodnju, pa su se pojavili postavni i radni motori bez kojih se i danas ne može zamisliti strojarska proizvodnja. Usporedno se je razvila i mehanizacija transportnih uređaja pomoću pneumatike (luke, rudnici, skladišta) kao i primjena u vozilima (kočni uređaji, pokretanje vratiju). To je tzv. "industrijska pneumatika".

Namjerno sam spomenuo ovu ranu primjenu pneumatike, jer je Nikola Tesla bio svjedokom tog razvoja. Iako je njegov rad prvenstveno vezan uz elektrotehniku, njegov široki **istraživački** duh ostavio je traga i na području strojarstva. Spominjem njegov patent pneumatskog motora pod nazivom "mehanički oscilator" kao i tzv. Tesline turbine koje rade na principu trenja [8].

U 20. stoljeću pneumatički medij nalazi primjenu u pretvorbi, prijenosu i obradi informacija. Tako je pneumatika utrla put u regulaciji procesnih postrojenja. Zbog sigurnosti od eksplozija, jednostavne konstrukcije i jednostavnog održavanja, pneumatički pretvarači, regulatori i ventili još i danas zauzimaju dominantno mjesto. Sličan je slučaj i s upravljanjem u strojarskoj proizvodnji, gdje se je kombinacija razvodnik - cilindar pokazala nenadomjestivom u jednostavnim i svrsislovnim zahvatima automatizacije. Pneumatika je prodrila i u mjernu tehniku, pa se sustav zaslon - - sapnica koristi niz godina za mjerenje, kao što su mjerenja oblika i dimenzija u industriji motora (Solex - postupak 1930 g.). Svi ovi uređaji malih dimenzija i precizne izrade klasificirani su kao "instrumentalna pneumatika".

Cijeli razvoj pneumatskih uređaja karakterizirale su s jedne strane eksperimentalne metode i intuitivni pristup, što je bilo usvojeno velikim brojem utjecajnih varijabli i nelinearnih odnosa. S druge strane, rješenja - sa stajališta automatizacije - bila su relativno jednostavna.

Snažan razvoj automatizacije nakon 2. svjetskog rata vezan je ponajviše uz elektroniku. U njenom okviru razvio se i teorijski pristup (informatika, teorija automatske regulacije, teorija digital-

nih automata) kao i praktična realizacija (poluvodička tehnika, integrirani krugovi, elektronička računala, dojavni sustavi). Po uzoru na nju koncipirana je i fluidika, novo područje strojarske tehnike. Razvijeni su aktivni i pasivni elementi kao i sklopovi, pa je omogućeno da se njihovim slaganjem realiziraju i složeni sustavi pneumatičkog upravljanja pri čemu se pomoću analogija prenose zasade iz elektronike. Već u samom početku razvoja fluidike ukazalo se na zaboravljeni Teslin patent iz 1916.g. pod nazivom "ventilni vod". Naime, Tesla je daleko ispred vremena uočio mogućnosti pneumatike u pretvorbi signala i upravljanju energijom, pa bi se mo lo reći da je njegova pneumatička dioda prvi fluidički element.

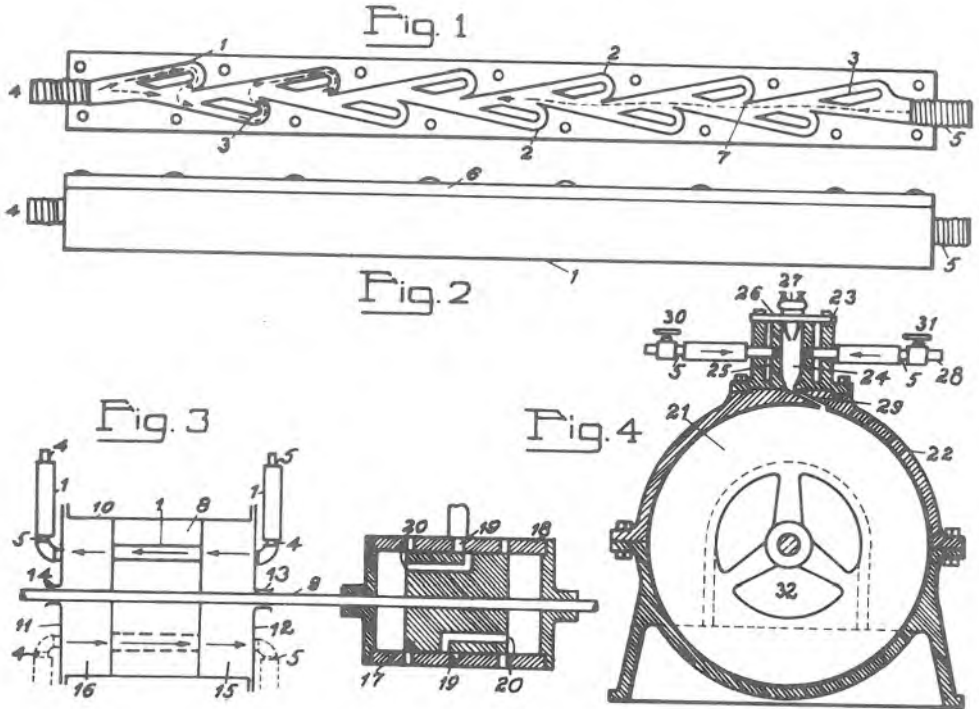
Iako je fluidika jos u razvojnjoj fazi, može se već sada konstatirati da ona ne može i neće biti konkurentna, već kompatibilna s elektronikom. To znači da će ona naći mjesto za određene primjene, uzimajući u obzir složenost sustava automatizacije, potrebne brzine i snage kao i uvjete rada [3, 4, 7, 8, 9].

2. Teslin "ventilni vod"

Patentni opis "ventilnog voda" ima 6 strana s 4 crteža a prijavljen je 21.02.1916.g. pod nazivom "Valvular Conduit" [8].

Osnovna je zamisao patenta da se kod upravljanja energijom u strojevima ventil s pokretnim dijelovima zamijeni fluidičkim elementom s ventilnim djelovanjem ali bez pokretnih dijelova. Kao što Tesla uvodno kaže:

"U većini strojeva koji se općenito upotrebljavaju u proizvodnji, prijenosu i pretvorbi mehaničke energije, fluidički impulsi trebaju proći, više ili manje slobodno, kroz pogodne kanale ili vodove u jednom smjeru, dok su u drugom smjeru efektivno prigušeni ili potpuno spriječeni. Ovu funkciju vrše općenito elementi označeni kao ventili, koji stvaraju pažljivo prilagođene dijelove čiji su precizni relativni pokreti bitni za djelotvoran i pouzdan rad aparata. Potpuna i potpuna ovisnost o ventilima ograničuje u mnogome stroj, smanjujući mu praktičnu vrijednost, znatno povećavajući troškove proizvodnje i održavanje. U pravilu je ventil delikatnog ustrojstva, vrlo podložan napanju i ispadanju iz pogona ... i ne zadovoljava kad su impulsi vrlo oštri ili u brzom slijedu, a fluidikuma ugrijan ili korozionog djelovanja".



Sl. 1.

Sam patent se odnosi na element čije su dvije projekcije prikazane crtežima 1 i 2, precrtanim s prve strane opisa patenta (sl.1). U kućištu 1 nanizani su u planarnoj izvedbi duž tračnog kanala džepni otvori 2 s izdancima 3. Na krajevima kućišta su izvodi 4 i 5 za priključak fluida, dok se poklopcem 6 zatvara kućište.

Ako na izvodu 5 vlada povišeni tlak u odnosu na izvod 4, strujanje fluida bit će gotovo pravolinijsko s otklonom od 10° - 20° , tako da je otpor strujanju minimalan. Promjena tlaka na izvodima izaziva strujanje čestica fluida u obratnom smjeru, ali je ono isprekidano. Strujanje fluida je skrenuto u džepovima za 180° i dolazi do vrtloga koji čestice fluida zakoče i ponovno ubrzavaju i to u brzom ritmu. Lako je uočiti da to izaziva znatne gubitke energije što se

očituje u povećanom otporu strujanja čestica fluida.

Mjerodavna za ventilno djelovanje je tzv. diodnost po protoku

$$D_v = \frac{Q_{\text{prop}}}{Q_{\text{zap}}}$$

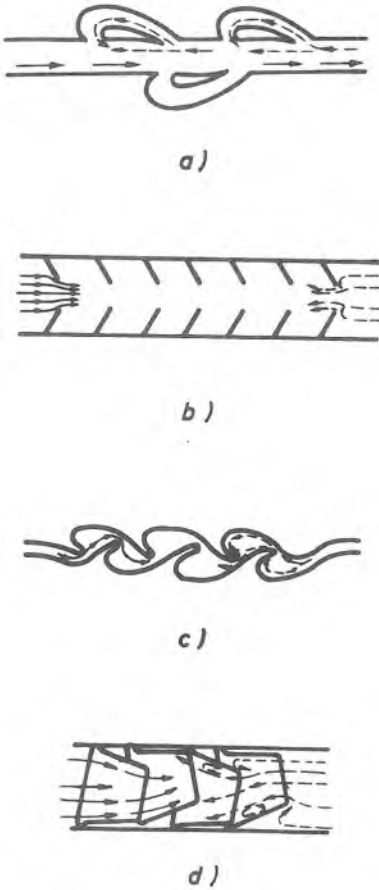
tj. omjer protoka u propusnom i zapornom smjeru uz isti pad tlaka. Diodnost ovisi o broju džepova, dužini elementa i glatkoći kanala, jer ostri rubovi povećavaju trenje u oba smjera. Tesla navodi da teorijski D može biti i 200 ali se odmah ogradauje na mnogo manje praktične vrijednosti.

slična ideja o ventilnom djelovanju postojala je i kod, od prije poznatih, "asimetričnih vodova". Kod njih šuplji džepovi samo zaustavljaju čestice fluida i otklanjaju ih za 90° stvarajući mirne "zaljeve". Iako i oni pokazuju stanovitu razliku između Q_{prop} i Q_{zap} , ipak se tu ne može govoriti o ventilnom djelovanju. Naprotiv, ventilni vod skreće čestice fluida za 180° i zbog pogodnog oblika kanala u džepu ne smanjuje im bitno brzinu. Tako se na ulazu u džep sudaraju čestice fluida s gotovo dvostrukom relativnom brzinom. Osim toga, dok su asimetrični vodovi predviđeni za polagane procese nepraktičnih dimenzija, njegov ventilni vod treba raditi kod veoma brzih procesa, pa su mu i dimenzije bitno manje.

Na sl. 1 vide se i moguće primjene ventilnog voda. Ne ulazeći podrobnije u same crteže, spomenimo da je na crtežu 3 prikazan klip cilindra 8, u koji je ugrađen ventilni vod 1. Brzim gibanjem osovine 9 pomoću tzv. "mehaničkog oscilatora" - još jednog Teslinog izuma - sniciranog desno, može se postići sabijanje ili razrjeđivanje zraka u komorama 15 i 16 cilindra.

Na crtežu 4 prikazana je primjena ventilnog voda u pogonu turbine; kao primjer je uzeta Teslina turbina gdje sila viskoznog trenja pokreće rotor. U komori 24 vrši se sabijanje zraka, koji ulazi preko ventila 30, i goriva koje ulazi preko ventila 31. Ventili osiguravaju pravilan omjer zraka i goriva. Uređaj za paljenje 27 izaziva eksploziju i razvijeni plinovi odlaze kroz sapnicu 29 u rotor turbine 21. Pokretanje rotora izaziva u komori 24 podtlak te dolazi do ponovnog pritjecanja zraka i goriva. Bitna je pri tome uloga ugrađenih ventilnih vodova u dovod goriva i zraka, koji slobodno propuštaju zrak i gorivo u komoru, a nakon eksplozije i formiranja visokog tlaka u komori djeluju nepropusno.

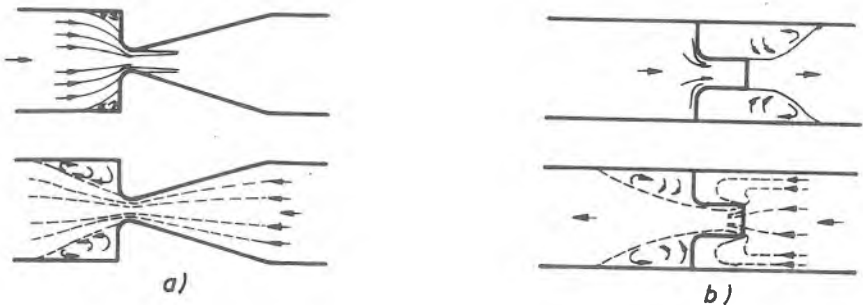
3. Daljniji razvoj fluidičkih dioda



Sl. 2

Razvoj fluidike 60-tin godina potaknuo je cijeli niz prijedloga i ostvarenja fluidičkih dioda. Ne ulazeći u podrobne analize, u ovom ću napisu dati sažeti pregled osnovnih tipova s kratkim opisom djelovanja. Svrha je toga da se sagleda Tesla ideja kroz projekciju kasnijeg razvoja [1, 2, 5, 6].

Cijevni vod dobio je odgovarajući moderni naziv Teslina dioda. Na sl. 2 su uz osnovni tip prikazana i poboljšanja, bilo u pogledu diodnog djelovanja bilo u pogledu ventiloske izvedbe. Tako se na sl. 3a vidi dioda s dijafrazama. Dijafrazme su raspoređene s obje strane kanala pod kutem različitim od 90° . Uz protok u zapornom smjeru (označen isprekidanim linijama), strujanje uz ravnice se otklanja u džepove i pri povratku se sudaraju s neokaljenim



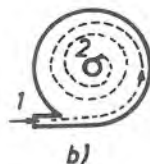
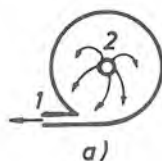
Sl. 3.

strujanjem, koje se suzuje. Neposredno nakon toga se naglo širi presjek protoka gdje se gubi energija. Dioda na sl. 2c ima ogibne kanale, dok je kanal diode na sl. 2d ispunjen nizom nakrivljenih šupljih konusa.

Sve ove izvedbe spadaju u tzv. otporne diode koje su konstruirane tako da se pomoću ostre promjene rubova protoka, stvaranjem vrtloga i izmjeničnim širenjem i sužavanjem strujanja ostvaruje otpor strujanju, različit u oba smjera. Diodno djelovanje na otpornom principu može se postići difuzorom na sl. 3a, gdje gubici nastaju kod naglog širenja presjeka strujanja i trenja, te pomoću sapnice na sl. 3b, gdje je ostrina rubova različita u oba smjera. Diodnost svih ovih tipova dioda kreće se oko 4. Bitno veća diodnost i do 50 ostvaruje se s vrtložnom diodom, koja potječe još iz 1929.g. Memora valjkastog oblika na sl. 4 ima dva izlaza: izlaz 1 leži tangencijalno, dok je izlaz 2 aksijalno i to okomito na ravlini ploče. Kad fluid struji iz koaksijalnog voda, otpor strujanju je vrlo malen, dok strujanje iz tangencijalnog voda stvara snažni vrtlog i veliki otpor.

Varijante otporne diode predstavljaju i tzv. zavojna dioda E.F. Linderotha te fluidni ispravljač A. Kantrowitza, patentirane 1955.g. odnosno 1960.g. [1], ali one ne odstupaju bitno od osnovne Tesline zamisli.

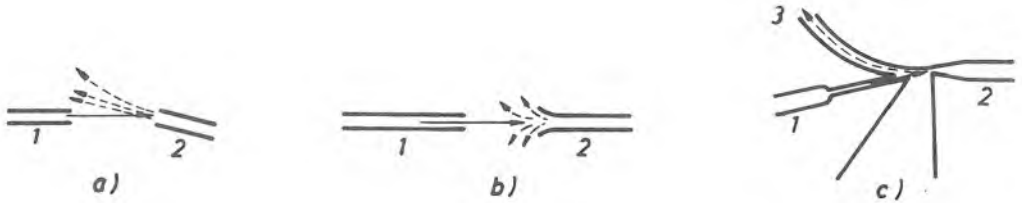
Za razliku od otpornih dioda, postoje i tzv. oslon-ske diode. Ulazna dioda na sl. 4a ima ulazni vod 1 i prihvatni vod 2. Iz geometrije diode je vidljivo da će u slučaju laminarnog strujanja doći do izrazitog diodnog djelovanja.



Sl. 4.

Slično se zorno vidi kod turbulentne diode na sl. 5b s koaksijalno smještenim vodovima 1 i 2. U jednom smjeru imamo laminarno strujanje s malim gubicima. U drugom smjeru se zbog proširenja voda 2 stvara turbulentno strujanje pa uz podjednaki razmak vodova ulazi tek mali dio strujanja u vod 1. Na kraju spomenimo i diodu koja koristi prijanjanje mlaza uz stijenku. Na sl. 5c je snematski prikazana konfiguracija s mlaznim vodom 1, prihvatnim vodom 2 te odzračiva-

njem 3 i 4. Mlaz iz voda 1 ulazi gotovo čitav u vod 2; mlaz iz obratnog smjera iz voda 2 kličući uz blago zakrivljenu stijenku voda 3, prijanja uz nju zbog stvorenog podtlaka uza stijenku (Coanda-efekt) pa veći dio mlaza izlazi kroz vod 3.



Sl. 5.

4. Zaključak

Teslina zamisao da primijeni pneumatički element s ventilnim djelovanjem, ali bez pokretnih dijelova, u upravljanju energijom bila je ispred vremena. Može se slobodno reći da je njegova fluidička dioda davna prethodnica fluidičkih elemenata, jer se je fluidika, kao nova grana strojarstva, razvila tek 50-ak godina kasnije.

5. Zahvala

Autor se i na ovaj način želi zahvaliti gosp. S. Dubrowu, direktoru Informacionog centra Sjedinjenih Američkih Država u Zagrebu za susretljivost kod pribavljanja potrebne dokumentacije.

. Literatura

1. P.J.Baker, A Comparison of Fluid Diodes, Proc. of the 2nd Cranfield Fluidics Conference, Cambridge, Paper D5, s. 88 - 115, 1967.
2. G.Belforte, On the Behaviour of Air Diodes, Proc. of the 3rd Cranfield Fluidics Conference, Torino, Paper P6, s. 89-100, 1968.
3. C.A. Belsterling, Fluidic System Design, J. Wiley & Sons, Inc., New York 1971.
4. K. Foster, G.A. Parker, Fluidics, J. Wiley & Sons, Inc., New York 1970.
5. I.V.Lebedev, S.L.Treshankov, V.S.Jakovenco, Elementi strujnoj avtomatiki, "Mashinostroenie", Moskva 1975.
6. V.Multrus, Pneumatische Logikelemente und Steuerungssysteme, Krausskopf-Verlag, Mainz 1970.

7. T. Surina, neki problemi kod projektiranja fluidičkih sustava, Zbornik radova JUKEMA 1, Zagreb, s.231 - 238, 1976.
8. N.Tesla, Valvular Conduit, U.S. Patent No. 1.329559, 1916.
9. L.A. Salimanzon, Teorija elementov pnevmoniki, "Nauka", Moskva 1969.



Josef Kortán
Ladislav Kučera

Institute of Radio Engineering
and Electronics, Czech.Acad.Sci.,
18088 Prague 8, Lumumbova 1
Czechoslovakia

RADIATIVE ENERGY CONVERSION IN ELECTRON BEAM SYSTEMS

Vacuum systems operating on the basis of interaction of electromagnetic field with intense relativistic electron beams are useful for the generation or amplification of microwave and optical signals. The short review shows basic types of interactions and modifications of systems, working either in the spontaneous mode or in a stimulated regime. The possibility of realization of the transit-time coherent amplifier or laser is discussed.

1. Introduction

Rapid advances in relativistic electron beam technologies have recently led to the development of high-current relativistic electron accelerators. These accelerators are now capable of generating beams with power levels higher than 10^{13} W for pulse lengths from 10 to 100 ns (1). They are used especially for such applications as plasma heating, collective ion acceleration, high-energy short-impulse lasers excitation, etc.

Less attention has been paid to the study of radiative effects connected with field-beam interaction. Theoretical results and some experiments indicate that this general approach includes a number of prospective methods of light generation and amplification (2 through 8). Both the spontaneous mode and the stimulated regime are possible. Consequently, a beam produces spontaneous mode, selective spontaneous or coherent radiation. The output radiative energy is covered either by the loss of beam energy, or by the energy of an external source. Inverse energy exchange, leading to the particle acceleration, is also possible.

Historically, attention was first focussed on parasitic radiation produced by particle accelerators. Its origin lies in spontaneous processes, following from the non-stimulated motion of particles. Consequently, this radiation is usually considered as the secondary parasitic effect of particle accelerators. In this connection it should be pointed out, that any collective radiative effect is always more or less stimulated due to internal coupling among beam particles. The decision about the spontaneous and stimulated behaviour apparently depends on the level of stimulation of the apriori selected mode. The stimulated regime is usually considered in systems with external control of the mode to be stimulated.

The study of stimulated instabilities in particle beams has shown new ways of controlling the output radiation of the beam. As an example, particle motion can be controlled by external coherent radiation (2) or by the spatially distributed magnetic field (7). Furthermore, the scattering can be stimulated in an external cavity. Practically, feedback stimulation is possible in direct (lineal) beams with predominating collinear scattering. The later condition is fulfilled in beams having an energy of an order of MeV.

Radiation produced by beam sources operating under stimulated conditions exhibits few advantages. It can cover the broad wavelength range, and some investigated systems are tunable. It is of interest, namely, to cover those wavelengths, for which up-to-date lasers are not available. In this connection the stimulated scattering in the submillimeter and infrared region is investigated. Some experiments have also shown the possibility of scattering of rtg and γ wavelengths (9); however, this process is spontaneous. As far as the field-beam interaction takes place in vacuum, radiation power is not limited by Joule's losses. This advantage is applicable to the amplification of giant light impulses.

This paper shows a few examples of beam generators and amplifiers. Their classification is made from the point of view of the type of energy exchange. The possibility of realization of a transit-time amplifier or laser is discussed. This system operates on the basis of stimulated Thomson scattering

and the gain of output radiation is covered by the beam energy loss (10). The transit-time principle of energy exchange is similar to the one used in microwave transit-time devices.

2. Classification and Examples of Beam Generators and Amplifiers

It is rather difficult to find a reasonable approach to the classification of a broad class of beam sources of radiation. In particular, the classification should take into account both "natural" sources of radiation (the accelerators themselves) and cases of "artificial" systems. In the latter case, a ready beam is taken from the accelerator and radiative output is obtained by additional beam control. Such control includes both the energy beam transformation and the control of beam motion, not contributing to the beam energy. From the practical point of view only "artificial" beam sources are of interest.

Radiative energy from beam sources can be covered in different ways. Our classification takes into account the basic types of energy exchanges. Possible modifications of beam control are shown in Fig. 1. From the point of view of energy exchange the following cases are possible:

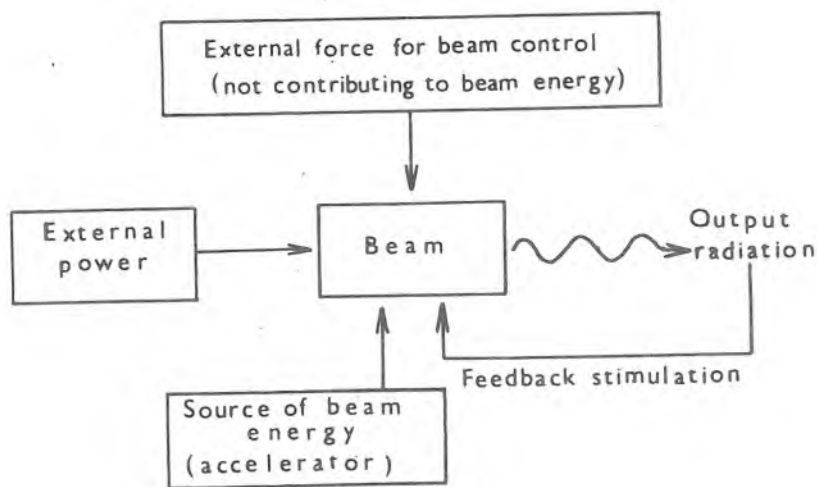


Fig. 1 General scheme of energy transfer in beam generators and amplifiers

1. power gain per mode is covered by beam energy loss,
2. power gain per mode is covered both by beam energy loss and by external source of energy,
3. power gain per mode is covered by external source of energy.

1. Systems with a spatially distributed magnetic field and the transit-time amplifier or laser are typical examples of first category. The transit-time laser will be discussed in the next chapter in more detail. The major line of investigation of the former systems has been centered on microwave generation resulting from strong nonadiabatic modulation by an externally applied magnetic field (4).

A single electron in a static magnetic field with the space period λ_0 radiates with a frequency of

$$\omega = \frac{c}{\lambda_0 (1 - \beta \cos \vartheta)}, \quad \omega_m \cong \frac{2c}{\lambda_0} \gamma^2, \quad (1)$$

where ω_m is maximum frequency corresponding to radiation in the direction $\vartheta = 0$, $\beta = \frac{v_0}{c}$, v_0 - electron velocity, c - velocity of light, γ is the relativistic gamma and ϑ is the angle between the direction of beam drift and the direction in which radiation is observed. Equation (1) is valid assuming that the angle of trajectory deflection from the direction of drift meets condition $\alpha \ll \frac{1}{\gamma}$. If the last condition is valid, electrons move harmonically and radiate across the whole length of their trajectory. In this case it is possible to use the dipole approximation for computing spectral distribution.

The case of electron motion, when it oscillates non-harmonically and the condition $\alpha \ll \frac{1}{\gamma}$ is not valid, is more interesting. If the field is increasing, the value of maximum frequency is decreasing. The maximum frequency ω'_m is given by

$$\omega'_m \cong \frac{2c}{\lambda_0} \gamma_{||}^2, \quad \gamma_{||}^2 = \frac{1}{1 - \beta^2 \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

The density of radiation increases proportionally to the square of magnetic field intensity, and higher harmonics occur in the spectrum.

The behaviour of real systems with a spatially distributed magnetic field is more complicated. The magnetic field usually used for modulation has both the transversal and the longitudinal component. Cyclotron type instabilities can arise in these systems. Likewise, other collective instabilities can arise in the beam under special conditions and they can evoke coherent radiation (7).

Granatstein et al. (7) observed submillimeter radiation of the power of 10^5 W. Such power levels cannot be explained by a single particle incoherent process. The stimulated scattering in a relativistic electron beam is a possible explanation of experimental results (11). The same mechanism is considered by Friedman and Herndon in order to explain the observed infrared radiation from electron beam (8).

2. This group includes the most frequently analyzed systems working on the principle of the relativistic mirror. Let us consider the following simple experiment. A plane wave with a frequency ω_0 and wave vector $\vec{k}_0$ perpendicularly strikes a perfectly reflecting mirror moving with a velocity v_0 in the opposite direction to $\vec{k}_0$. The back scattered wave is denoted by a frequency and wave vector $\vec{k}_s$. The frequency of the scattered wave ω_s is due to up-converted Doppler shift. The relation between ω_s and ω_0 is given by

$$\omega_s = (1 + \beta)^2 \gamma^2 \omega_0, \quad (3)$$

where $\beta = \frac{v_0}{c}$ and $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$.

A similar relation holds for the energy W_0 of the incident wave and for energy W_s of the scattered wave

$$W_s = (1 + \beta)^2 \gamma^2 W_0 \quad (4)$$

Equations (3), (4) show that frequency and energy conversion is possible by this method. For example, for the mirror moving with $\beta = 0,99$ ($\gamma = 6$), the

incident coherent microwave radiation of the wavelength $\lambda_0 = 3$ cm is converted into radiation of a wavelength $\lambda_s = 0,21$ mm. It is evident, that the frequency of scattered radiation can be tuned by varying β or ω_0 . The practical problem is how to construct a suitable relativistic mirror in laboratory conditions.

While recently Sprangle and Granatstein proposed a stimulated cyclotron resonance as a suitable scattering mechanism (5), Pantell et al. earlier suggested stimulated Compton scattering (12). The use of spontaneous Compton scattering for the generation of polarized γ radiation has been also suggested (13) and later realized (9).

3. This category includes, as an example, cyclic accelerators. In this connection it should be emphasized, that in previous groups "ready" beams were considered, i.e., an accelerator proper as a radiative source was not taken into account.

Output radiation resulting from circular electron motion is a parasitic phenomenon, which limits the operation of cyclic accelerators. No stimulated effect has been observed in these systems.

Generated radiation called synchrotron radiation, displays some interesting properties. High power, continuous and wide range of the spectrum (ultraviolet part of $50 - 2000 \text{ \AA}$ spectrum, soft rtg radiation) and high degree of polarization are properties, which have not been achieved so far by any other source (14). Due to the Doppler shift the frequency range is shifted substantially to higher frequencies as compared to the frequency of the cycle. The single electron energy loss per cycle, ΔW , converted into radiative energy, is given by

$$\Delta W = \frac{88,5 W^4}{R} \quad (5)$$

where W is electron energy in GeV and R the trajectory radius in meters. The dimension of the ΔW variable is in keV. In contemporary high-power cyclic accelerators the ΔW variable is of the order of 10 keV and the number of

electrons in orbit is about 10^{10} up to 10^{11} . Although only a small part of radiation leaves an accelerator, these systems are the highest-power sources of radiation in specific ranges of the spectrum.

3. Transit-time amplifier or laser

If coherent radiation passes through a direct relativistic electron beam, collinear scattering predominates. Depending on the direction of electron velocity, direction of incident radiation and direction of scattered radiation, four collinear scattered modes are possible. The analysis has shown (10), that only the forward scattered mode without frequency shift and up-converted mode exhibits an increasing gain with increasing electron velocity. As a result, these two modes can be stimulated only.

The stimulation of the up-converted mode has been suggested earlier by Pantell et al. (12). The frequency of the suggested laser can be tuned by changing electron velocity. The probability of stimulation of the up-converted mode is strongly limited by the coherency loss due to dispersion in electron velocities.

The stimulation of the forward scattered mode without frequency shift is possible, as far as the gain is covered by the beam energy loss. Such an energy transfer is achieved on the transit-time principle. The mechanism of energy transfer is caused by the magnetic field component which excites longitudinal electron oscillations (in addition to the transverse oscillations caused by the electric field component). Owing to longitudinal oscillations the electron velocity and the longitudinal force is produced, causing electron energy loss. Owing to the loss of beam energy the passing radiation is amplified. The stimulation of the mode without frequency shift is more probable because it is not limited by electron velocity dispersion. The transit-time system can work as a coherent amplifier or laser (Fig. 2). Figure 2 shows the polarization of passing radiation. The incident radiation is approximated by the linearly polarized wave.

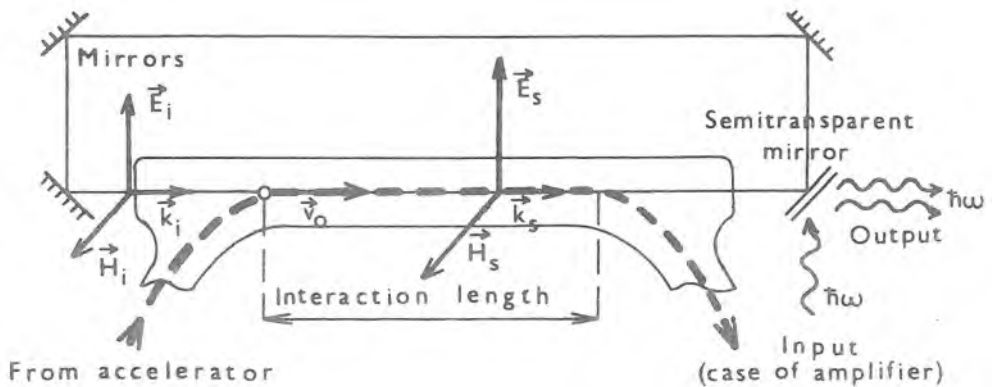


Fig. 2 Scheme of a transit-time amplifier or laser

The above energy transfer is similar to that used in microwave transit-time devices (transit tubes, microwave baritts). From this point of view our model is the coherent optical modification of the transit vacuum microwave tube, described earlier by Llewellyn and Bowen (15). It should be pointed out, that Pantell's laser and the transit-time laser work on different principles and exhibit a different behaviour. The frequency of Pantell's laser is determined by the Doppler shift and the system works with an external source of radiation. The gain of transit-time laser is achieved on the account of beam energy loss and the coherent power gain depends in a complicated way on incident electron velocity, electron concentration, interaction length, passing optical power and frequency. Both aperiodic energy loss and the component introduced by beam modulation contribute to the gain. In relativistic beams the small velocity and density modulation causes large mass (momentum) modulation.

4. Conclusion

In recent years a number of methods has been suggested how to convert beam energy into radiative energy. Stimulated processes in particle beams are, namely, of interest. The paper shows a few examples of suggested beam generators and amplifiers.

The described transit-time laser works on similar principle as radio-frequency transit-time devices. The mode without frequency shift is stimulated in the direct relativistic electron beam. The coherent power gain is achieved on the beam energy loss.

5. References

1. W.T. Link, "Electron beams from 10^{11} - 10^{12} watt pulsed accelerators", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-14, pp. 777-781, 1976
2. V.P. Sukhatme, P.A. Wolff, "Stimulated Compton scattering as a radiation source-theoretical limitations", J. Appl. Phys., vol. 44, pp. 2331-1334, 1973
3. V.P. Sukhatme, P.A. Wolff, "Stimulated Magneto-Compton Scattering-A Possible Tunable Far Infrared and Millimeter Wave Source", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-10, pp. 870-873, 1974
4. W.M. Manheimer, E. Ott, "Theory of microwave generation by an intense relativistic electron beam in a rippled magnetic field", Phys. Fluids, vol. 17, pp. 463-473, 1974
5. P. Sprangle, V.L. Granatstein, "Stimulated cyclotron resonance scattering and production of powerful submillimeter radiation", Appl. Phys. Lett., vol. 25, pp. 377-379, 1974
6. Y. Carmel, J.A. Nation, "Application of intense relativistic electron beams to microwave generation", J. Appl. Phys., vol. 44, pp. 5268-5274, 1973
7. V.L. Granatstein, M. Herndon, R.K. Parker, S.P. Schlesinger, "Strong Submillimeter Radiation from Intense Relativistic Electron Beams", IEEE Trans. on MTT, vol. MTT-22, pp. 1000-1005, 1974
8. M. Friedman, M. Herndon, "Generation of intense infrared radiation from an electron beam propagating through a rippled magnetic field", Appl. Phys. Lett., vol. 22, pp. 658-660, 1973
9. ----, "Laser-induced polarized photon beams above 0.5 GeV," 1965 Proc. Internat. Symp. on Electron and Photon Interaction at High Energies, Hamburg, p. 445

10. L. Kučera, J. Kortán, "Stimulated Thomson Effect With Transit-Time Energy Conversion In a Beam of Fast Electrons", Proc. of 10th Congress of the Int. Comm. for Optics, Prague 1976
11. P. Sprangle, V.L. Granatstein, L. Baker, "Stimulated collective scattering from a magnetized relativistic electron beam", Phys. Rev. A, vol. 12, pp. 1697-1701
12. R.H. Pantell, G. Soncini, H.E. Puthoff, "Stimulated Photon-Electron Scattering", IEEE J. Quantum Electron., vol. 4, pp. 905-907
13. F.R. Arutyunian, V.A. Tumanian, "The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams", Phys. Lett., vol. 4, pp. 176-178, 1963
14. M.N. Jakimenko, "Mošćnyje ictočniki ultrafioletovogo i rentgenovskogo izlučeniya", Usp. fiz. nauk, t. 114, s. 55-66, 1974
15. E.G. Llewellyn, A.E. Bowen, "The Production of Ultra-High-Frequency Oscillations by Means of Diodes", Bell System Tech. Journal, vol. 18, p. 280, 1939.

IX. Poglavlje

RASVJETA



Prof. Branko Jemrić
Tvornica električnih žarulja TEŽ
Zagreb

METALNO HALOGENSKE ŽARULJE KAO PERSPEKTIVNI IZVOR DANJE SVJETLOSTI

Opisan je razvoj metalno halogenih žarulja MHV od 1960. godine do danas. Dati su teoretski i praktični osnovi funkcioniranja tih žarulja. Iznose se značajke prve generacije metalno halogenih žarulja. Razmatraju se značajke druge generacije i problem metalnih dodataka u izboju u odnosu na spektar i boju svjetlosti. Raspravlja se karakter spektra i mogućnost postizavanja kontinuiranog spektra kao što ga ima, na primjer, danja svjetlost. Opisuje se izmjena spektra upotrebom višeatomnih molekula u izboju. Razmatra se treća generacija metalno halogenih žarulja s molekularnim zračenjem, njihova svojstva i perspektiva, žarulja s aluminium halogenidima, naročito s aluminium kloridom. Razmatra se problem paljenja metalno halogenih žarulja, iznesena su područja primjene i perspektivna upotreba MHV žarulja.

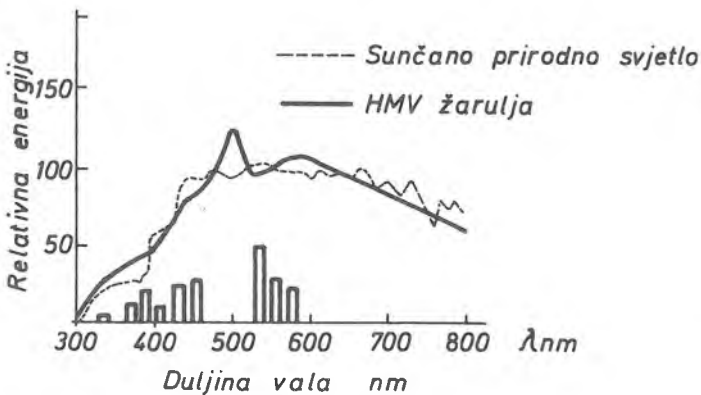
METAL HALIDE LAMPS AS POSSIBLE FUTURE DAYLIGHT SOURCES

The development of metal halide lamps since 1960, in terms of theoretical considerations, characteristics and principles of practical functioning, can be divided into several generations. The second generation posed problems such as the use of metal additives in the discharge in relation to light spectrum and colour. Spectrum quality is also related to the possible achievement of a continuous spectrum such as, for example, that of daylight. The spectrum can be changed by using multiatom molecules in the discharge.

The third generation of metal halide lamps involves molecular emission; here particular attention can be focussed on the prospects of lamps containing halides of aluminium, aluminium chloride in particular.

Another field of interest is that of metal halide lamp ignition. Current fields of use, and future applications of metal halide lamps are reviewed.

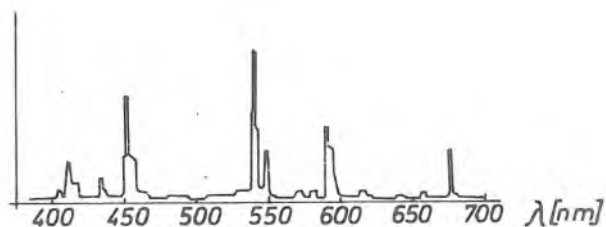
Napretkom rasvjetne tehnike, a naročito pojavom novih vrsta izvora svjetlosti, sve su veće mogućnosti i izgledi za ostvarenje davne želje čovjeka - jednog takvog izvora svjetlosti koji će nadomjestiti prirodnu danju sunčanu svjetlost. Prije desetak godina bili smo zadovoljni izvorom svjetlosti na osnovi izboja kroz plin xenon koji nam daje izvanredan spektar danje svjetlosti pa ga upotrebljavamo i danas. No, nažalost, samo za specijalne svrhe, s obzirom na nepraktičnost i cijenu za masovniju upotrebu. Zbog toga su se posljednjih godina tražila i dalje nova rješenja polazeći od masovno upotrebljavanih i već dobro poznatih živinih visokotlačnih žarulja. Ti su izvori svjetlosti poslije 1960. godine napredovali utoliko ukoliko su pronadjeni novi fluorescentni materijali za korekciju boje svjetlosti, kao što je bio germanium fluorogermanat i kasnije yttriumvanadat europium koji se i danas upotrebljava. Na taj način je samo djelomično riješen problem povećanja udjela crvenog spektra u svjetlosti, no spektar je i nadalje ostao linijski s relativno slabom reprodukcijom boja predmeta i skromnim svjetlosnim iskorištenjem. Osim toga, takve žarulje, zbog velike površine zračenja svjetlosti iz balona prekrivenog fluorescentnim prahom, nisu prikladne za upotrebu u reflektorima. Tražilo se bolje



Spektar HMV žarulja u usporedbi sa spektrom prirodne sunčane svjetlosti

rješenje, koje je nadjeno u dodavanju i drugih elemenata (metala) ili njihovih spojeva u izboj kako bi se dobila miješana kvalitetnija svjetlost s obzirom na različite boje koje ti metali zrače u izboju. Birani su takvi metali koji zrače traženu boju svjetlosti, a imaju određeni pritisak para i napon gorenja kod postignute radne temperature kvarcnog žiška. U prvoj izbedbi takvih novih visokotlačnih žarulja bili su upotrijebljeni elementi kao natrij (Na), indij (In) i talij (Tl) koji su, doduše, odgovarali s obzirom na dobiveni linijski spektar svjetlosti, ali nisu odgovarali tehnološki, jer su reducirali stijenke kvarcnog žiška. Kasnije se našlo rješenje tog problema upotrebom istih metala u formi jodida koji ne reduciraju kvarc, dok se nalaze kraj stijenke žiška, a u luk izboja dolaze samostalni disocirani u automarnom stanju i zato daju opet svaki svoj linijski spektar. Termičkim strujanjem plina unutar žiška vraćaju se atomi metala opet natrag kraj stijenke žiška, koja je na nižoj temperaturi, pa se opet vežu za jod i na taj način stalno zaštićuju stijenku kvarca od redukcije.

InJ - TlJ - NaJ - Hg - Žarulja



Spektar VTHM žarulja s linijskim spektrom

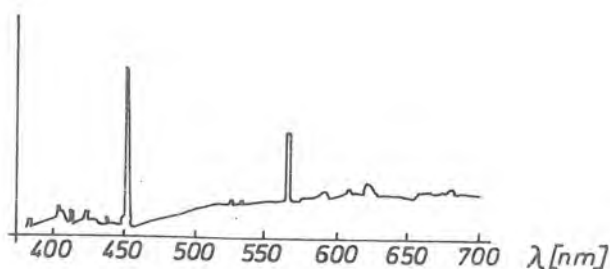
Linijski karakter spektra svjetlosti tih metalno halogenih žarulja prve izvedbe, koji nastaje od uzbudjenih atoma u centru izboja, bio je izvjesno poboljšanje, ali kako je manjkao kakav-takav kontinuirani spektar, nije bilo još niti govora o zračenju danje svjetlosti koja ima izrazito kontinuirani spektar. Ukratko, kod opisane prve izvedbe metalno halogenih žarulja, dobili smo u spektru žutu boju natrija 589 nm, zelenu taliya 535 nm i plavu boju indija 410 i 451 nm. Spektar postaje bogatiji, svjetlosna iskoristivost se povećava za oko

40% u odnosu na čisti živin izboj, a index reprodukcije boja isto se poboljšava od $R_a = 25$ na $R_a = 65$.

Istražujući daljnje mogućnosti za poboljšanje spektra, nastala je druga izvedba ili familija metalno halogenih visokotlačnih žarulja kod kojih su upotrijebljeni halogenidi rijetkih zemalja, kao što su disprozij (Dy), holmij (Ho), talij (Tl) itd. S ovim dodacima dobivamo u spektru veći broj linija, a javlja se i jedan kontinuirani dio, tako da je boja svjetlosti mnogo bolja, a faktor reprodukcije može postići i vrijednost od $R_a = 90$.

Treća familija metalno halogenih žarulja nastala je prije nekoliko godina, kada se je dodavanjem metalnih spojeva, kao npr. SnJ_2 u visokotlačni izboj, dakle određenih molekula, dobio kontinuirani spektar svjetlosti. Upotrebom kositrenog jodida ili bromida dobiva se izvanredna svjetlost kontinuiranog spektra, boje oko 5500°K s nedostatkom smanjenog svjetlosnog iskorištenja u odnosu na drugu familiju. Zračenje kontinuiranog spektra nastaje u srednjim i vanjskim zonama luka, dakle kod niže temperature između $2000\text{--}3000^\circ\text{K}$, dok u jezgri luka zbog vrlo visoke temperature oko 5500°K , dolazi do disocijacije molekula i do zračenja linijskog spektra kositra. Do smanjenja svjetlosnog iskorištenja dolazi zbog slabe termičke stabilnosti SnJ_2 molekule, kojih je koncentracija zbog toga u zonama luka viših temperatura sve manja, a upravo u tim zonama dolazi do njihove uzbude i do zračenja svjetlosti. Zbog toga treba tražiti takve molekule koje će imati veći termički stabilitet, odnosno koje će se raspadati istom kod viših temperatura i, drugo, da prilikom skakanja elektrona nastane po mogućnosti vrpčasti spektar što većeg intenziteta i kvaliteta u vidljivom području. Tako

SnJ_2 - Žarulja



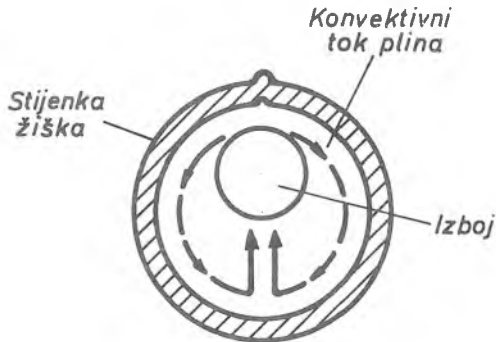
Spektar VIHM žarulja s kvazikontinuiranim spektrom

se je došlo i do izvedbi s kositrenim bromidom Sn Br_2 i kloridom Sn Cl_2 . Dok Sn J_2 ima iskorištenje oko 55 lm/W, Sn Br_2 već ima oko 75 lm/W, a Sn Cl_2 čak 90 lm/W. Na žalost, kloride ne možemo za sada upotrebljavati zbog razornog djelovanja na katode. Od ostalih elemenata, s kojima su rađene probe, treba napomenuti aluminium (Al) i olovo (Pb) kod čega je, na primjer, aluminium u formi klorida Al Cl_3 dao upravo zapanjujući rezultat od skoro 110 lm/W, dok olovni klorid Pb Cl_2 daje oko 90 lm/W. Budući da kloride ne možemo za sada upotrebljavati, ostaje nam na raspolaganju kositar koji kao jodid, a naročito bromid, daje za sada najbolje rezultate u praktičnoj primjeni. Spektar se isto mijenja primjenom bromida, odnosno klorida u pozitivnom smislu, tj. postaje sve više kontinuiran i intenzivan. Od ostalih metala koji mogu služiti za popravak spektra, dolaze u obzir torium (Th), litium (Li), skandium (Sc), cezium (Cs) i galium (Ga), koji svojim prisustvom u izboju znatno utječu na koordinate boja svjetlosti i faktor re-produkcije boja predmeta Ra.

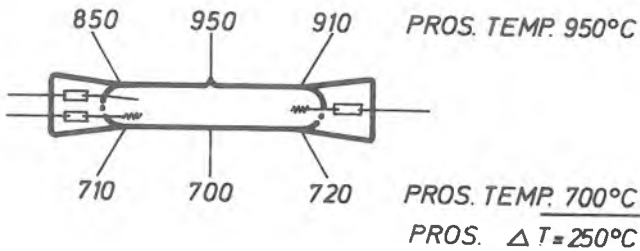
Svojstva metalno halogenih žarulja

Žarulja	Punjenje	(lm/W)	T °K	Ra	Spektar
Živina VTFE	Hg	54	4000	45	linijski
Metal halogene VTH /I/	NaJ, TLJ, InJ, Hg	85	5000-6000	60-70	linijski
Metal halogene VTH /II/	TLJ, DyJ ₃ , HoJ, Hg	80-90	4500-6000	65-90	mnogolinijski
Kositar halogene VTH /III/	SnJ ₂ , SnBr ₂ , In, Hg	50-60	5000-6000	90-95	kontinuiran
Aluminium halogene VTH /III/	AlJ ₃ , AlBr ₃ , AlCl ₃ , Hg	70-110	5800-7000	70-90	kontinuiran

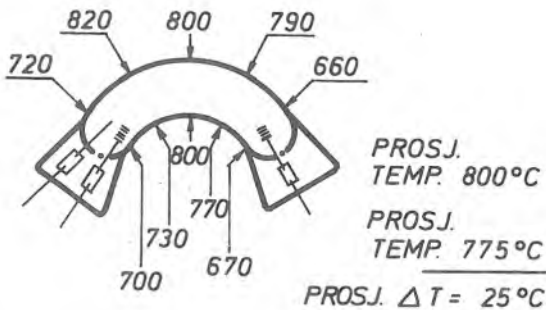
Poseban je problem položaj gorenja ovih žarulja, kao uostalom i kod živinih visokotlačnih, jer dolazi do smanjenja svjetlosnog toka u horizontalnom položaju gorenja. Ono nastaje zbog prirodne cirkulacije plinova unutar žiška i toplinskih gubitaka konvekcijom. Zbog tih pojava jezgra luka se iz središta cijevi žiška pomiče prema gornjoj stijenci žiška. Zbog toga znade biti tempera-



Pomicanje centra luka prema gore u izboju VTHM žarulja kod horizontalnog položaja gorenja.

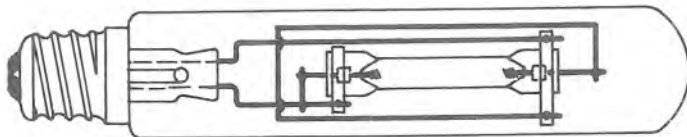


Temperaturna raspodjela na kvarcnom žišku VTHM žarulje u horizontalnom položaju gorenja



Temperaturna raspodjela na savinutom kvarcnom žišku VTHM žarulje u horizontalnom položaju gorenja

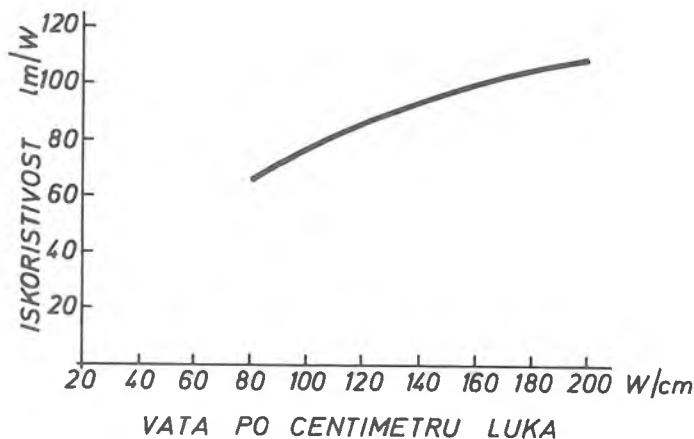
turna razlika između donje i gornje strane kvarcne cijevi žiška i do 250°C . Na taj način dolazi do hlađenja luka i uslijed toga do smanjenja svjetlosnog iskorištenja. Danas postoje dva načina za rješenje tog problema, i to: prvo, savijanjem kvarcne cijevi žiška i, drugo, takvom montažom dovodnih elektroda za električnu struju u žarulji da one svojim magnetskim poljem djeluju na pomicanje luka natrag u centar žiška.



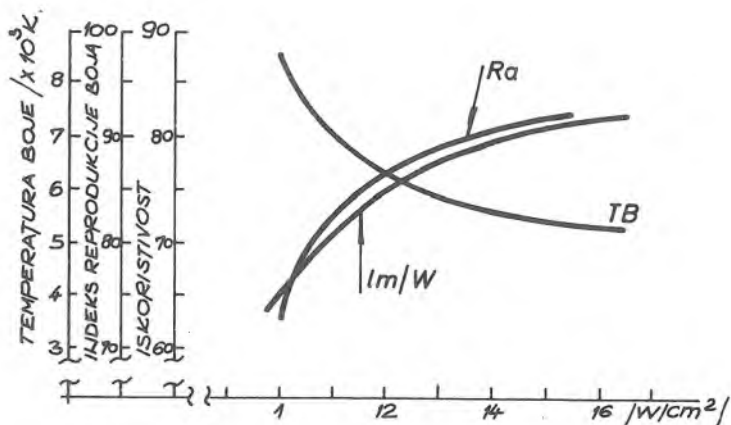
Konstrukcija i položaj dovodnih elektroda VTHM žarulje za horizontalni položaj gorenja kako bi se iskoristilo djelovanje magnetskog polja struje na luk žiška

Ako bismo sada rezimirali problem postizanja optimalnog svjetlosnog iskorištenja ? (1m/W), možemo na osnovi iznesenog zaključiti da će ? ovisiti o:

1. izboru dodatka određenih halogenida elemenata koji trebaju imati što intenzivnije zračenje u vidljivom spektru;
2. da bi se istovremeno postigla optimalna boja svjetlosti, treba umjesto čistih atoma metala upotrebljavati i molekule, tj. njihove spojeve s halogenim elementima. Na taj način se osigurava više kvazikontinuirani spektar;
3. povećanje snage žarulje također povećava svjetlosno iskorištenje, ali je ograničeno za sada smanjenjem trajnosti i izdržljivosti žiška, kako njegovom konstrukcijom i materijalima, tako i opterećenjem luka, koje danas može biti najviše do 120 W/cm ;
4. vrlo važan podatak je i dozvoljeno opterećenje površine stijenki žiška (W/cm^2) koje ako raste, raste i iskorištenje ? i faktor reprodukcije boja R_a , ali pada temperatura boje svjetlosti.



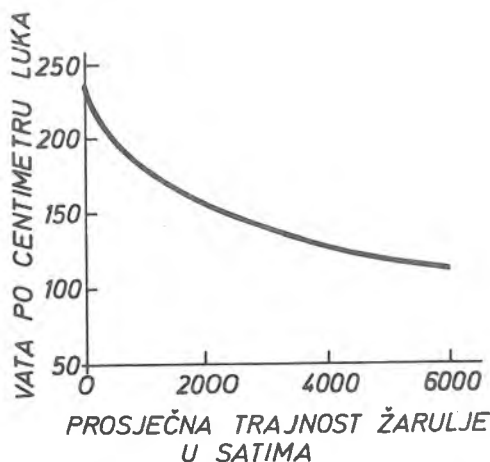
Promjene svjetlosne iskoristivosti VTHM žarulja u ovisnosti o opterećenju luka žiška u W/cm dužine luka



Iskoristivost indeks reprodukcije boja Ra i temperatura boje svjetlosti VTHM žarulja kao funkcija opterećenja stijenke žiška

Trajnost

Trajnost metalno halogenih žarulja iznosi oko 6000 sati, ako se uzme kao osnova za trajnost, vrijeme u kojem žarulja izgubi 30% svjetlosnog toka. Pad svjetlosnog toka uzrokovan je nestankom metalnih iona i raspršivanjem elektroda. Nestanak metalnih iona uzrokovan je elektrolitičkom selidbom iona metala kroz kvarc, ovo naročito u slučaju Na, i reakcijom metala i kvarcnog stakla s ostacima kisika, vodika ili vlage u žišku. Ustanovljen je, na primjer, nestanak Tl, In i Dy uslijed ovog procesa.



Prosječna trajnost VTHM žarulja u
ovisnosti o opterećenju luka žiška

Usprkos velikih prednosti metalno halogenih žarulja, pogotovo primjenom molekularnog izboja, čime postižemo izvanredan spektar svjetlosti s visokim Ra i praktički se gotovo približavamo danjoj svjetlosti a uz relativno visoko svjetlosno iskorišćenje, ipak moramo napomenuti i neke nedostatke tih žarulja.

Nedostaci bi se mogli svesti na slijedeće:

1. vrlo različite boje svjetlosti već prema primjeni pojedinih metalnih dodataka, tako da će biti neophodno potrebna međunarodna sistematizacija tih svojstava;
2. spektar svjetlosti se mijenja, i to:
 - a) zbog promjene položaja gorenja,
 - b) zbog nejednakog trošenja nekih metala u žišku;
3. za sada nemogućnost konstrukcije žarulja malih snaga;
4. napon paljenja je relativno visok pa su potrebni specijalni aparati za paljenje;
5. cijena žarulje i predspojne sprave je relativno visoka.

Ipak, usprkos ovih nedostataka, upotreba tih žarulja je sve veća, zahvaljujući kvaliteti boje svjetlosti. Još prije nekoliko godina te su se žarulje u izvedbi od 2 kW gotovo isključivo upotrebljavale za vanjsku rasvjetu sportskih objekata. Razlog tome je bio prvenstveno boja svjetlosti koja je omogućila pri-

jenos utakmica za kolor televiziju i bistar balon žarulje, što je omogućilo upotrebu reflektora s obzirom na povoljno fokusiranje u usporedbi s balonom živine žarulje prevučenim fluorescentnim prahom. Nakon ovog početka došlo je do proširenja asortimana po snazi, tako da danas imademo na raspolaganju metalno halogene žarulje od 250, 400, 1000, 1500 i 3500 W čime su otvorene mogućnosti za različitu upotrebu. To drugim riječima znači da nam je omogućena i upotreba za unutrašnju rasvjetu, jer je reprodukcija boja predmeta i boja svjetlosti kvalitetnija nego od fluorescentnih cijevi. Tako možemo već danas tvrditi da će upotreba metalno halogenih žarulja za unutrašnju rasvjetu biti sve veća, naročito za rasvjetu robnih kuća, industrijsko-proizvodnih prostora, školskih prostorija, prodavaonica, gimnastičkih dvorana i raznih drugih prostora. Međutim, za ovako široku primjenu još nema odgovarajućih svjetiljki koje bi bile postojane za visoke temperature, zaštićene od zaprašivanja i korozije i koje bi imale takvu raspodjelu svjetlosti, a naročito luminaciju, da se mogu uklopiti u postojeće propise za unutrašnju rasvjetu. Od ostalih mogućnosti za upotrebu treba napomenuti slobodne sportske objekte i igrališta, rasvjetu prometnica, a u području unutrašnje rasvjete, naročito kazališne i TV pozornice, radi prijenosa u boji, u kojem slučaju su te žarulje gotovo bez konkurencije.

Ukratko, možemo reći da će metalno halogene žarulje uskoro postati isto toliko važan izvor svjetlosti kao što su bile fluorescentne cijevi u posljednje dvije dekade.

Literatura:

1. F. Koury, W.C. Gungle, J.F. Waymouth: A new generation of metal halide lamps; IES Transaction 1/1975.
2. A.G. Chalmers, D.O. Wharmby, F.L. Whittaker: Comparison of high pressure discharges in mercury and the halides of aluminium, tin and lead. Lighting Research and Technology, Vol. 7. No.1, 1975.
3. A. Dobrusskin: Halogen-Metall dampflampen mit seltenen Erden; Lichttechnik Nr. 3/71.

4. A. Dobrusskin: Neue Halogen-Metall dampflampen mit 250 W und 400 W Leistungsaufnahme I; Lichttechnik Nr. 8/1971.
5. E. Fischer, R. Lorenz, L. Rehder: Lichterzeugung durch quasikontinuierliche Molekularstrahlung in Hochdruck-Gasentladungslampen Lichttechnik Nr. 10/1972.
6. P.C. Drop, R. Lorenz: Eigenschaften und Möglichkeiten von Zinnhalogenid - Entladungslampen
7. P.C. Drop, E. Fischer, F. Oastvogels and G.A. Wesselink: Metal - halide discharge lamps; Philips techn. Rev. 347-353, 1975, No 11/12.



Fedor Kritovac
Centar za industrijsko oblikovanje
Zagreb, Trg maršala Tita 9

RASVJETA KAO KRITERIJ KVALITETE LJUDSKE OKOLINE

Za razliku od prirodnog osvjetljenja, rasvjeta je tvorevina povijesnog razvoja kulture i civilizacije, a u današnjem urbaniziranom životu, ona je bitan uvjet funkcioniranja i kvalitete raznih životnih situacija, te je tako neizostavan kriterij ukupne kvalitete okoline. Krizna stanja okoline karakterizira i nedostatak sirovina i energetske kapaciteta, što u slučaju električne energije rezultira restriktivnim postupcima u korištenju rasvjete. Restrikcije u rasvjetljavanju, kako pokazuje analiza situacije u jugoslavenskoj sredini, baziraju se na kvantitativnim normativima, ne vodeći računa o velikom broju kvalitativnih konsekvenci, koje izazivaju niz negativnih poremećaja u socijalnoj organizaciji života. Kvalitet okoline stagnira i nazaduje, a da se restrikcijom nisu postigle bitne uštede. Stoga je potrebno rasvjetu uočiti kao bitno svojstvo kvalitete okoline, a ne kao zavisnu varijablu u postizanju kvantitativne ravnoteže elektroenergetske situacije u kriznim energetske i tehničkim okolnostima.

LIGHTING AS A CRITERION OF ENVIRONMENTAL QUALITY

Unlike natural lighting artificial illumination is the outcome of the historical development of civilization. In present-day urbanized living it bears essentially upon the functioning and quality of life situations. This makes it an integral criterion of overall environmental quality.

Environmental crises are characterized by the shortage of raw materials and energy resources; in the case of electric power this has resulted in lighting restrictions. The analysis of the Yugoslav situation shows that these restrictions are based on quantitative standards, disregarding a great number of qualitative implications and upsets in the social organization of life. The quality of the environment stagnates and declines, and no substantial savings have been achieved by the restrictions. Accordingly, lighting should be appreciated as a salient feature of environmental quality, and not as a dependent variable in the achievement of a quantitative electric power balance in crisis conditions.

1. Prirodno osvjetljenje i razvoj rasvjete

Osim što je za čovjeka kao biološko biće svjetlo bitna komponenta njegove psihofiziološke životne ravnoteže, ono mu kao prirodno osvjetljenje omogućuje mnogobrojne utilitarne djelatnosti, ali i estetsku doživljajnost. Ljudska su osjetila, pa stoga i djelotvorni postupci, predodređeni prvenstveno za dnevno osvjetljenje, a cikličke i izvanredne mijene prirodnog osvjetljenja bude elementarne i profinjene emocije, meditacije - bilo u zori, sumraku, na mjesecini ili zenitnom suncu.

Rasvjeta, a ona je svrhovito djelo ljudskih ruku i uma, radilo se i o tako prirodnom mediju kao što je vatra, nadomještava manjak ili traženu kvalitetu prirodnog osvjetljenja, osvjetljavajući svojim vlastitim razvojem povijest ljudske kulture i civilizacije.

Tokovi urbanizacije očituju se u razvojnim etapama rasvjete: od luči do raznolike električne rasvjete. U suvremenom urbaniziranom životu rasvjeta, pretežno električna, integrirana je u sve važne funkcije: od javne rasvjete do intimnog osvjetljenja dječje kolijevke ili semafora. Daleko od toga da je ona nadomjestak prirodnom osvjetljenju, što nikada ni nije u potpunosti mogla biti, ona predstavlja bitno novi kvalitet, kao što i stereo-zvuk, uistinu, manje predstavlja idealnu imitaciju prirodnog zvuka, koliko samosvojnu akustičko-estetsku kvalitetu.

Životna okolina ukupnost je i presjecište raznih sredina: proizvodnih, stanovanja, administrativnog rada, školovanja, trgovačkih djelatnosti, javnog prostora grada itd., gdje sve one imaju svoje posebnosti u odnosu na rasvjetu. Sredine, premda posebne, međusobno su odijeljene i nepovezane samo relativno, te stoga o rasvjeti kao zadovoljenom kriteriju kvalitete ukupne životne

okoline, možemo govoriti tek onda ako su uspostavljena tražena kvalitetna stanja rasvjete za pojedine sredine, ali uravnoteženo međusobno povezane.

Čini se da je za rasvjetu u postizanju što kvalitetnije okoline dovoljno da se studiozno proučavaju karakteristike pojedinih sredina i njihove sistemske povezanost, te da se pronadu i primijene tehnološki podobni, prostorno i oblikovno odgovarajući i funkcionalno ispravni načini rasvjetljavanja. Doista, danas raspolazemo s velikim brojem podataka /od ergonomskih uputa do rezultata istraživanja psihosocioloških osobina pojedinih grupa korisnika/ kojim se možemo poslužiti da na ispravan i zanimljiv način rješavamo rasvjetu od osvjetljavanja saobraćajnica do crtaćih stolova, od rasvjete parkova do tunelskih prolaza itd.

Međutim, unatrag nekoliko godina u svijetu, a i kod nas, su aktualizirani novi problemi, čije spoznavanje, tumačenje i rješavanje postaje prvorazredno kada se govori o rasvjeti kao kriteriju kvalitete okoline.

Iscrpljivanje sirovinskih i energetske resurse, a uz istovremeni trend povećanog potroška energije u razne svrhe, djelovali su, između ostalog, i na distribuciju i trošenje električne energije, pa tako i rasvjete, - što se u prvom redu očituje određenim restrikcijama energetskog utroška, pa tako i restrikcijama kvantitativnog i kvalitativnog korištenja predmetima koji se napajaju energijom.

Restriktioni postupci snižavaju ili zadržavaju postignut stupanj neke kvalitete, u našem slučaju kvalitete rasvjete. S jedne strane, prema tome rasvjeta se ne koristi na optimalan i adekvatan način, a smanjenjem njene kvalitete umanjuje se ukupan kvalitet životne okoline. Restriktiona situacija izaziva i

znatne socijalne probleme, čime se također bitno smanjuje kvalitet naše ukupne životne organiziranosti.

Nekoliko posljednjih godina, koliko smo u našoj sredini suočeni s tim pitanjima, daju dovoljno ozbiljnih povoda za detaljniju analizu ovog problema, pogotovo jer se ukazuju potrebe i mogućnosti drugačijeg pristupa fenomenu i značenju rasvjete od onog, kakav je započet i kakav se još i nastavlja.

2. Kriza okoline

Analizirajući fenomene i uzroke kriznih stanja u okolini i pripremajući se za potrebne akcije, još uvijek smo spremni da prvenstveno govorimo o mjerama zaštite, što znači: poduzimanje takovih intervencija koje će spriječiti daljnji razvoj onih procesa za koje se smatra ili ustanovljuje da su izazivači kriznog stanja u okolini - zadržavajući ih na zatečenom nivou ili im čak smanjujući nivo procesnog intenziteta. Budući da se zagađenje okoline također još uvijek pretežno poistovjećuje samo sa tehno-loškim aspektom /gdje su u središtu pažnje postupci u vezi s kemijsko-fizičko-biološkim aspektima zagađenja/, to se čini da su i mjere zaštite dovoljne samo ili većim dijelom u sferi tehnoloških intervencija. Restriktivna politika u energetici /na čiju se mogućnost, ali ne i neizbježnost upozoravalo već prije nekoliko godina, kada su dosta egzaktno predviđene granice i termini iskoristenja drgovinskih rezerva!/, također je poseban oblik zaštite. Međutim, svaki postupak zaštite, premda sprečava daljnje krizno pogoršanje, u naravi je stagnantan, jer ne predviđa razvoj, a posebno ne - kvalitativni.

Danas se ne govori više samo o zaštiti, već i o unapređenju okoline, pa se gotovo uvijek ta dva pojma ne laze skupa. Termin je zaštita i unapređenje okoline. To znači da se spoznalo da zašti-

ta sama po sebi nije rješenje. Ona, dakle, ne rješava bitno probleme, ukoliko se, uz razloge koji je uvjetuju, ipak ne pokušaju ostvariti neki daljnji razvojni programi, premda svakako na novim i drugačijim koncepcijama nego li što je počivao razvoj industrijalizacije vjerom u neiscrpivost prirodnih resursa i univerzalne mogućnosti tehničkih postupaka. Uporedo sa spoznajom da je potrebno koncipirati razvojne polazišta za daljnju situaciju, sve više se promatraju kvalitativni, a ne samo kvantitativni aspekti zaštite odnosno unapređenja.

3. Kvalitativni i kvantitativni aspekti u energetske eksploataciji

Energetska kriza u svoj dalekosežnosti, pogotovo pomanjkanje električne energije, zateklo nas je, kako organizaciono, tako i na izvjestan način teoretski, nepripremljene. U tim posebnim okolnostima, svojim intenzitetom, dosada nepoznatim, primijenjeni su prvenstveno, da ne kažemo isključivo, kvantitativni kriteriji analize i vrednovanja, dok su kvalitativni zanemareni. Koncentriralo se na balans između kvantuma energetskih potencijala, te kapaciteta prerade i prijenosa u odnosu na predviđenu potrošnju. No potrošnja, premda globalno locirana po potrošačima u pojedinim sredinama: industriji, domaćinstvima, komunalnim djelatnostima, zdravstvu itd. iskazuje se sa numeričkim veličinama predviđenih količina u određenoj vremenskoj jedinici potrošnje /uobičajeno: godišnja bilansa i godišnji plan, odnosno prognoza/. To, međutim, nije kvalitativna analiza i kvalitativno predviđanje. Kvalitativni aspekti su oni koji se odnose na relevantnost, kategoriju i nivo neke eksploatacije. Utrošak jedne sijalice od 100 w. npr. uvijek je jednak sa kvantitativnog stanovišta utroška energije, no bitna je razlika u tome za kakvu se namjenu

utrošak koristi; da li je to reflektna sijalica, obična, prozirna, opalna, matirana itd; da li se ona koristi u odgovarajućoj svjetlosnoj armaturi, te kako se ona vremenski /doba dana, intenzitet dnevnog svjetla/ i prostorno /pravilan razmještaj itd/ koristi. Kvalitativni aspekt eksploatacije odnosi se, dakle, na namjenu - energetskeg utroška i način iskorištenja predviđene namjene!

Kvalitativna analiza trošenja električne energije, a to se naročito tiče rasvjete, nije razvijena; ona je, što više, i zanemarena. Jedan od razloga je i taj što njena eksploatacija još uvijek nije u sferi interesa ni kompetencije organizacija za proizvodnju i distribuciju električne energije, odnosno još i dalje u djelovanju interesnih zajednica proizvođača i korisnika, nego u nadležnosti /i to isključivoj kad su situacije krizne/ posebno ovlaštenih organa.

Nadalje, u pomanjkanju ili na niskom nivou kvalitativne analize korištenja elektroenergije, također nisu zapaženi niti povezani u cjelinu posredni efekti, tj. posljedice funkcioniranja, odnosno nefunkcioniranja onih predmeta koji koriste elektroenergiju. Tako su se npr. prvih dana najžešćih restrikcija 1973. g. ljudi čudili što se rapidno povećao broj saobraćajnih nesreća, krađa, bolesti /zbog prehlade/ i loše konzumacije /hladna jela/ itd. Još čitav niz "nevidljivih" procesa djeluje na energetskej osnovi elektrike.

4. Normativne karakteristike eksploatacije

Koliko i zašto trošiti električnu energiju, osim tamo gdje je to tehnološki tačno i egzaktno određivo, podliježe uglavnom dogovorenoj normi. Norma je često toliko rastezljiva da ono što se jučer proglašava luksuzom postaje svakodnevna razumljiva potreba, ili kao što se upravo u našoj sredini događa - obratno! Osvjet-

izlozi i građevine, da je u mnogim ulicama u vrijeme zimskih mjeseci utrnuo preko 50% rasvjetnih mjesta, odjednom bivaju svjesni svoje zablude i krive percepcije. Organizirana i usmjerena štednja to nije, pogotovo jer građanin u njoj ne sudjeluje kao aktivan subjekt i nije svjestan prave vrijednosti kvaliteta života od kojih je prinuđen da se odriče. U našoj sredini postoji još uvijek tendencija da se kao osnovni, su izvjesnim momentima i kao jedini razlog nedostatka električne energije tumači nepovoljnošću atmosferskih prilika, tj. nedostatnim i neravnomjernim oborinama.

Na taj se način u društvu izgrađuje predodžba da je i rasvjeta, kao neki samostalan prirodni fenomen, nepredvidiva okolnost. Time rasvjeta gubi svojstva svrhovitog i kontroliranog ljudskog procesa i svodi se na dimenziju nepredvidivosti prirodnog osvjetljavanja.

6. Pomak u području i načinu potrošnje

Prisilnoj štednji u javnoj sredini javlja se kao kompenzacija relativno slobodno trošenje za vlastite potrebe. Kvalitet okoliša reducira se sada na sredinu individualnog i porodičnog obitavanja u čemu se očituje i socijalna degradacija. U gradovima restrikcijom rasvjete poglavito je pogođen javni prostor /osvjetljenje ulica, izloga, natpisa, itd/. Dolazi do obezvjeđivanja javnog standarda, te do popuštanja socijalne koherencije u urbanim cjelinama. Ljudi se dakle povlače još jače u svoja okružja. Da se nešto kupi treba naprezati oči u polumraku izloga, niz ulica i pristupa postaje doslovce i opasan od napada i padova, a o radosti šetnje u veselju svjetla nema ni govora.

7. Poseban značaj javnog osvjetljavanja u urbanim strukturama

Ogroman značaj i različitost aspekta javne rasvjete u gradskim, općenito urbanim strukturama, potrebno je pobliže objasniti.

ljavanje izloga i svijetlećih natpisa smatra se odjednom čak i eksplicitno luksuzom, umjesto orijentacijom i informacijom, što u biti i jest. Jučerašnja situacija prije nastupa restriktione politike u trošenju elektroenergije za rasvjetu označit će se kao normalna, premda znamo da je ona bila na daleko nižem stupnju razvijenosti nego li prosječan standard razvijenijih zemelja.

Restriktiona politika zamjenjuje se "nježnijom" riječi "štednja" s tendencijom da se i postojeća situacija normira kao normalna tj. kao da i ne treba i ne smije da bude drugačija. Tada će otpasti i potreba da se govori o štednji jer će se prihvatiti novi normativ. To, da će taj biti na znatno nižoj razini kvalitete standarda života i predstavljati devaluaciju ukupne kvalitete okoline, čini se da nas još posebno ne brine.

5. Privikavanje ili svijest o potrebi štednje?

Ali razlozi prelaska na novi sniženi normativ, iako u prvi mah kao da su očiti, nisu sasvim jasni ni jednostavni. Javnosti je saopćeno da se rasvjeta kao kvalitet mora žrtvovati, kako se ne bi ugrozile vitalne funkcije rade industrije, zdravstva, komunikacija itd, no te tvrdnje nisu dokazane. Pretpostavilo se vjerojatno da će ograničavanje rasvjete djelovati /principom zastrašivanja/ općenito na pojačano ponašanje štednje energije u svakom pogledu. Govorit će se o relativno visokoj svijesti građana, o njihovoj spremnosti na štednju. U to ne bismo smjeli biti sigurni. Iscrpnijim prikazom dalo bi se dokazati da se u velikoj mjeri, ako ne i presudno, stanovništvo svjesno i nesvjesno privikava na datu situaciju. Zapita li se niz ljudi da li danas zamjećuju nešto neobično u osvjetljenju grada, većina će ih reći, primjećujući samo relativno poboljšanje u odnosu na najradikalniji režim ograničavanja /ali koje još nije dostiglo ni prijašnji normativ!/, da je sve u redu. Upozori li ih se da još uvijek nisu osvjetljeni mnogi

izlozi i građevine, da je u mnogim ulicama u vrijeme zimskih mjeseci utrnuto preko 50% rasvjetnih mjesta, odjednom bivaju svjesni svoje zablude i krive percepcije. Organizirana i usmjerena štednja to nije, pogotovo jer građanin u njoj ne sudjeluje kao aktivan subjekt i nije svjestan prave vrijednosti kvaliteta života od kojih je prinuđen da se odriče. U našoj sredini postoji još uvijek tendencija da se kao osnovni, a u izvjesnim momentima i kao jedini razlog nedostatka električne energije ističe nepovoljnost atmosferskih prilika, tj. nedostatak i neravnomjernost oborina.

Na taj se način u društvu izgrađuje predodžba da je i rasvjeta, kao neki samostalan prirodni fenomen, nepredvidiva okolnost. Time rasvjeta gubi svojstva svrhovitog i kontroliranog ljudskog procesa i svodi se na dimenziju nepredvidivosti prirodnog osvjetljavanja.

6. Pomak u području i načinu potrošnje

Prisilnoj štednji u javnoj sredini javlja se kao kompenzacija relativno slobodno trošenje za vlastite potrebe. Kvalitet okoline reducira se sada na sredinu individualnog i porodičnog obitavanja, u čemu se očituje i socijalna degradacija. U gradovima je restrikcijom rasvjete poglavito pogođen javni prostor (osvjetljenje ulica, izloga, natpisa, itd.). Dolazi do obezvredjivanja javnog standarda, te do popuštanja socijalne koherencije u urbanim cjelinama. Ljudi se, dakle, povlače još jače u svoja okružja. Da se nešto kupi treba naprezati oči u polumraku izloga; niz ulica i pristupa postaje, doslovce, i opasan zbog napada i padova, a o radosti šetnje u veselju svjetla nema ni govora.

7. Poseban značaj javnog osvjetljavanja u urbanim strukturama

Ogroman značaj i različitost aspekta javne rasvjete u gradskim, općenito urbanim strukturama, potrebno je поближе objasniti.

Upozorit ću ovdje na slijedeće aspekte:

- . informacioni
- . red i nered
- . simbolički
- . tzv. ludičku funkciju

Ukidanjem značenja rasvjete za sve, osim što nije strogo utilitarno /elementarno osiguranje prepoznavanja nekog prostora/, onemogućavaju da svjetlo djeluje i informacijski - gradski urbani prostor ostavili smo samo bačenom svjetlu fiksni svjetlosnih izvora monotonosti gradske rasvjete. Tu bismo uzeli u obzir kao dinamičke izvore osvjetljenja jedino farove automobila. /Sociološki je vrlo zanimljivo da se intenzitet, većinom individualnog prometa i osvjetljenja koje ono daje, svjesno ukalkuliralo kao kompenzacija totalnoj redukciji, kada je grad Zagreb 1973.g. doslovce bio u mraku!/

Uz pretpostavku da je kvantitativno uspostavljeno zadano uravnoteženje rasvjetnog utroška za dispoziciju rasvjete na mnogim mjestima, moglo se već uočiti da je rasvjetno oblikovanje proizvoljno: dok je ponegdje jedno za drugim za redom ostavljeno nekoliko izvora da svijetli, opet ih je na drugom mjestu nekoliko pogašeno, pojedini su dijelovi ulica ostajali potpuno bez rasvjete, da bi u preostalom dijelu zasjeli u potpunosti.

U očekivani strukturirani urbani red unesena je jaka komponenta nereda čime se objektivno i subjektivno degradira ukupna urbana kvaliteta sredine. U restrikciji osvjetljenja dolazi do pada opće informacione vrijednosti: cijelo urbano tkivo percipira se nejasno i polovično, a one informacije koje su ovisne o svjetlu da emitiraju svoju poruku, ukinute su gotovo posve, od reklama pa katkada i do saobraćajnih putokaza. To što one često ne funkcioniraju ni inače, nije opravdanje, već je pokazatelj da komu-

nelni sistem nije sreden i znak je niske urbane kulture. Svijetlećim informacijama pridijeva se epitet luksuza, a to je pokazatelj poremećenog sustava vrijednosti u reguliranju urbanih potreba.

Osvjetljavanjem se potcrtava simboličko značenje pojedinih objekata ili urbanih cjelina. Već samim svjetlosnim akcentiranjem kao izuzećem iz svjetlosne nivelacije, daje im se posebno značenje, a umjesnim svjetlosnim oblikovanjem posebno će se moći potencirati karakteristike objekata. Kvaliteta oblikovanja rasvjete nije, doduše, nezavisna od svjetlosne kvalitete koju energija daje, no nije s njome ni jednostavno proporcionalna.

Sa skromnijim sredstvima od korištenih postiže se, znamo, često kud i kamo bolji efekt /pretjeranost difuzne fluorescentne rasvjete npr. u lokalima i izlozima i nedostatna uporaba usmjerenih reflektorskih rasvjetnih tijela jedan su primjer/.

U "normalnom" stanju rasvijetljenosti simbolička funkcija slabo je izražena. Ili točnije, ona je krivo usmjerena. Uz fetišizaciju saobraćaja kome se, čini se, još uvijek sve ostalo podvrgava, nije neobično što su /barem u Zagrebu/ najveću svojevremenu pažnju javnosti /gotovo senzaciju/ izazvala postavljanja monumentalnih rasvjetnih stupova na nekim važnim raskršćima. Bez namjere da se umanji raznolikost dobre rasvjete za sigurnost saobraćaja, u prvom se planu ipak našla simbolička funkcija: potcrtati važnost saobraćaja i brige grada za što većom reprezentativnošću važnog saobraćajnog čvora /no zato, što se Zagreba tiče, godinama stoje demolirani sigurnosni parterni stupići na pješačkim otocima, osvijetljenih i signaliziranih pješačkih prelaza nema, itd/. Vrijednost nogometa npr. naznačena je u našem društvu i svjetlom. Za večernje utakmice rasvjeta se nemilice troši.

U svom simboličkom značenju uz određeni objekt, urbanu cjelinu, ali i manifestaciju /Nove godina, Dan Republike, itd/, ali i oslobođeno te svrhe, svjetlosni život ima ludičku funkciju. Zbog svjetla ljudi su, pojednostavljeno rečeno, radosni: ono učvršćuje osjećaj društvene povezanosti u urbanim sredinama. Vatromet, okićeni bor, npr. imaju i tu funkciju.

Ovim razmatranjem nastojalo se objasniti neke od najvažnijih kvalitativnih aspekata rasvjete u suvremenom urbanom društvu i upozoriti na njih kao na bitne kriterije kvalitete ukupne ljudske okoline.

Budući da se u situacijama nedovoljnog raspolaganja s električnom energijom redovito još uvijek primjenjuju restrikcioni postupci, koji pogode upravo rasvjetu /i to osobito javnu/, to se ne radi samo o boljem upoznavanju vrijednosti rasvjete u društvenom životu, već se traži i promjena onih jednostranih odluka /koje počivaju prvenstveno na kvantitativnim analizama/, a koje onemogućavaju da se rasvjeta iskoristava na adekvatan način u svim svojim funkcijama, kako utilitarnim tako i estetskim.

Između ostalog, to će zahtijevati analiziranje komplementarnih energetske izvora za rasvjetu, davanje prioriteta javnom standardu, studiranje oblikovanja ambijenta i rasvjetnih tijela u uvjetima štednje, ali tako da se ne snižava kvaliteta eksploatacije vrijednosti, te istraživanje i prognoziranje eko-socioloških posljedica.

"LIGHT SOURCES - PAST, PRESENT, AND FUTURE"

Summary

The performance of modern light sources are materials limited. Further significant improvements in lamp efficacy requires new materials of lamp construction. The probability of success in our search for more efficient light sources is greatest in the high intensity discharge area.

One important trend of current lamp research is directed towards the development of electrodeless high intensity discharge devices. Electrodeless lamp designs eliminate the constraints imposed by electrodes which in turn increases the possible choices of lamp fill materials. The concept of electrodeless lamp designs was first advanced and demonstrated by Tesla in the 1890's.

"LIGHT SOURCES - PAST, PRESENT, AND FUTURE"

Tesla's most important contribution to lighting was the development of the polyphase alternating current system. This concept permitted, for the first time, the efficient and economical distribution of power over long distances. This, in turn, created a tremendous demand for lighting. The emphasis on lighting in the infant electrical industry is evidenced by the fact that much of the equipment, such as transformers, were rated in "lights" rather than watts. Westinghouse Electric & Manufacturing Company used Tesla's polyphase system to light and power the Chicago World's Fair in 1893. When the switches were closed and twelve generators supplied power to 250,000 lamps, Tesla must have enjoyed a great moment of triumph.

Tesla had early concluded that the search for high efficiency devices to convert electrical energy to visible light would be more productive in areas other than the carbon filament incandescent lamp. At a meeting of the American Institute of Electrical Engineers in May 1891, Tesla delivered a paper entitled, "Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination." In this paper he associated molecular vibration with the generation of light, and he proposed to bottle the gases of the air and set them in vibration electrically. This was in keeping with his conclusion that everything in nature operated on the principle of vibrations that correspond to alternating currents.

Tesla later described four new concepts of electric light using electrically activated gas-filled tubes.

- (1) Tubes in which a solid body was rendered incandescent
- (2) Tubes in which phosphorescent and fluorescent materials were caused to luminesce
- (3) Tubes in which rarefied gases became luminous and
- (4) Tubes in which luminosity was produced in gases at ordinary pressures

Tesla studied the effects of passing high-frequency currents through gases at all pressures below atmospheric of a variety of gases. This work lead him to the invention of a number of gas discharge light sources. I am sure that Tesla's demonstration of these light sources at the Chicago World's Fair stimulated D. McFarlan Moore to develop and announce commercially available gas discharge lamps in 1904. This early work performed by Tesla was a significant step on the path towards the commercial realization of fluorescent lamps, the light source that currently produces the major portion of our illumination.

Tesla designed and built an advanced generation of carbon-arc lamp street-lighting equipment. For this work he obtained a number of patents.

My purpose here is to review the state-of-the-art of light sources and to project the impact of some of the technology now on the scientific horizon. There is a popular misconception that all important development work on light sources was done in the past. I hope to illustrate that far from being stagnant, scientific advancements are coming forth at an ever-increasing rate. Light source research and development is perhaps more exciting now than ever before. The thrust of the energy problem is providing stimulus for the search for light sources with ever-increasing efficacies. During the course of this lecture it should become clear that all of our light sources have performances limited by materials. Our lamp designs are pushing the performance limits of available materials of lamp construction. It is therefore evident that many future major advances in lamp technology will require materials not presently available.

If we could design a light source which emitted substantially white light with all its output concentrated into the visible spectrum, it would have an efficacy of at least 250 lumens-per-watt. This is the objective that lamp designers are striving for. We will try to predict the principal areas from which developments leading towards this objective will come.

The incandescent lamp of 1881 had an efficacy of 1.7 lumens-per-watt. The introduction of non-ductile tungsten as a radiator in 1904 raised the efficacy to 7.85 lumens-per-watt. The introduction of coiled filaments and gas-fill raised the efficacy to 15 lumens-per-watt by 1920.

The incandescent light sources of today are very similar to those available

twenty years ago. Since the introduction of the coiled-coil filament over twenty years ago there have been no major technological innovations leading to improvements in the efficacy of the ordinary general purpose incandescent lamp. To be sure there have been many evolutionary changes leading to small incremental gains in efficacy, such as improvements in the control and refinements of tungsten wire, process improvements at coil winding and lamp manufacturing, and new materials of construction, such as getters.

We all know that during the burning life of a general purpose incandescent lamp, tungsten evaporation leads to bulb blackening causing loss of light output and to a reduction in the diameter of the filament which will accelerate eventual failure of the lamp. The development of the halogen containing lamp is an answer to this difficulty. Halogen lamps contain, in addition to the inert gas fill, one of the elements from the halogen group consisting of iodine, bromine, chlorine, and fluorine. The halogen creates a transport cycle which transfers evaporated tungsten from the bulb wall to the filament and leads.

The present incandescent lamp delivers an efficacy of 18-30 lumens-per-watt. The incandescent lamp is a very inefficient device; the efficiency of energy conversion, that is, conversion of input energy to the desired energy, just approaches 10% for tungsten halogen and barely 6% for general purpose lamps, delivering 18 lumens-per-watt.

Normally an incandescent lamp filament will fail when less than 10% of the tungsten has been evaporated. This is due to the fact that selective evaporation takes place at crystal boundaries. In general the greater the number of crystal boundaries, the greater the susceptibility of the filament to premature breakage. Many impurities that may be present in the lamp will preferentially attack the crystal boundaries. Recognition of these factors is stimulating development work leading

towards improved tungsten wire and better control of lamp impurities. We can look forward to continued evolutionary improvements in efficacy towards the 58 lumens-per-watt maximum with tungsten.

The general purpose incandescent at a filament temperature of 2950°K yields 17.5 lumens-per-watt. If we had a filament that would survive a temperature of 6600°K , we would obtain the highest efficacy possible by normal incandescence an efficacy of 95 lumens-per-watt. The possibility of such a substantial advance had led many investigators on an intensive search for new high temperature filament materials. This significant amount of work spanning the last twenty years has not resulted in the discovery of any new materials leading towards a practical light source. We can therefore conclude the search for a light source approaching the theoretical objective of 250 lumens-per-watt may be more fruitful in other areas.

The incandescent lamp is and will continue to be a useful light source in the lighting designer's library of light sources.

There are many applications that require a multitude of small sources to attain the desired lighting design objectives.

Perhaps we may develop some day the ability to refocus on the filament some of the now wasted infrared energy -- this would obviously lead to more efficient lamp performance.

FLUORESCENT LAMPS

The most successful exploitation of the electric discharge has been in the fluorescent lamp. This light source now provides well over 60 percent of man's needs for artificial light. This source has matured in the past 30 years. It is now available in a wide variety of spectral power distributions, loadings and sizes.

The basis of operation of the fluorescent lamp is the low pressure mercury discharge. This low pressure discharge is designed to maximize emission in the ultraviolet region of the spectrum: This radiation in turn serves to excite the fluorescent phosphor which will emit the desired useful energy. The lamp geometry and loading is adjusted to operate the low pressure discharge at a mercury pressure that yields the maximum resonance radiation at a wavelength of 253.7 nanometers. The fluorescent phosphor bulb coating is designed to accept this ultraviolet radiation and convert this energy into visible light. This conversion takes place accompanied by a quantum loss of energy of approximately 50 percent.

Today's fluorescent lamp delivers an efficacy of 85 lumens-per-watt. The energy conversion efficiency of 25 percent is considerably higher than for incandescent sources, though still not very good. With presently available phosphor systems it is estimated that perhaps we may someday attain an efficacy of 100 lumens-per-watt. There is, however, the prospect of a substantial gain to be realized by the development of a new phosphor system. What I am referring to is the development of anti-stokes phosphors. With the successful reduction to practice of this new phosphor system, it is estimated that a fluorescent lamp efficacy of 150 lumens-per-watt may be attainable.

This interesting possibility for the future lies in the discovery of new phosphors which, in defiance of Stokes' Law, can transform infrared energy to visible. These materials absorb two quanta of infrared to give one quantum of visible light. We can envision the use of these substances to utilize the waste heat energy generated by fluorescent lamps to further increase efficacy. The anti-Stokes phosphors are not useful at the present time because of their narrow-band excitation characteristics. The development of materials with broad-band excitation characteristics will make possible improvements in all light sources that generate wasted infrared energy. Once again we must look elsewhere in our

search for light sources approaching our theoretical objective of 250 lumens-per-watt minimum.

HIGH INTENSITY DISCHARGE

High intensity discharge light sources now offer many alternatives to the more traditional incandescent and fluorescent sources. The high intensity family now includes the types of mercury, metal-halide and high pressure sodium. The lamp industry fully recognizes that important potential gains in performance can be realized in the high intensity discharge area. It is for this reason that research in this area has been emphasized in lamp development laboratories: This emphasis will continue.

The first practical high-intensity discharge lamp (H.I.D.) appeared in the late 1930's -- the mercury lamp. Today's mercury lamps produce 63 lumens-per-watt. Unlike fluorescent lamps, mercury lamps are compact, offering good optical control.

The color of clear mercury lamps is not very good. The cold bluish-green light distorts color and is generally not acceptable in color sensitive applications. The reason for the poor color is due to the radiation output of a mercury lamp being essentially limited to four lines in the visible spectrum -- a blue, green, violet, and yellow line. To improve the color deficiency, phosphors have been developed to modify the color of mercury lamps by filling vacancy in the spectrum. Phosphor coated mercury lamps are now available with several different phosphor blends.

Color rendition on the newer phosphor coated lamps is now acceptable for many commercial applications, but do not answer the color requirements of color critical applications.

METAL-HALIDE LAMPS

In the search for higher efficacy and improved color, a relatively new family of H.I.D. lamps was developed -- the metal-halide lamp. There are many materials whose radiation characteristics are ideal to fill the vacancies in the mercury lamp spectral power distribution. Unfortunately, these materials in their pure form have too low a vapor pressure to be useful. This constraint was eliminated by introducing them into the lamp as the halide -- usually as the iodide.

The iodide has a much higher vapor pressure than the pure metal, and hence serves as a vehicle to transport and introduce the metals into the discharge at useful pressures. The operating principle of the metal-halide lamp may be summarized in this manner. At room temperature the metal additives are tied-up as the iodides and are condensed on the arc tube wall along with mercury. Under operating conditions the wall temperature is raised to a high temperature causing the wall condensates to vaporize. Convection currents carry the iodides to the core of the arc discharge where dissociation occurs, thus permitting the metals to emit their characteristic atomic radiation.

Some of the metals used in metal-halide lamps include sodium, thallium, indium, scandium, cesium and many others.

By the proper selection and combination of the halides used, it is possible to completely fill out the visible spectrum and therefore produce "white" light; that is, all colors are represented. The result is a substantial increase in light output and efficacy, an efficacy of better than 100 lumens-per-watt. We can now more effectively convert electrical energy into visible light and do it with the bonus of vastly improved color properties.

Because of its high efficacy, its good color and its small size, the metal-halide

has been used in many applications that have traditionally used fluorescent and/or incandescent sources. The metal-halide has become one of our most versatile light sources, delivering an efficacy of 125 lumens-per-watt, with good color, and a small source size.

HIGH PRESSURE SODIUM

A more recent addition to the growing list of high intensity discharge (H.I.D.) sources is the high pressure sodium lamp introduced in the late sixties. This source characterized by its golden-yellow color is gaining wide acceptance for general street, highway, and industrial lighting applications.

High pressure sodium lamps produce light by passing a discharge current through sodium vapor. Light is produced at the rate of up to 140 lumens-per-watt, nearly twice the efficacy of mercury lamps and six times that of incandescent lamps. High pressure sodium lamps are compact, and have clear bulbs; this makes them ideal for applications requiring good optical control, such as street and highway lighting. Many of our cities have already converted from mercury lamps to high pressure sodium to upgrade their street lighting and this trend is expected to continue.

A disadvantage of sodium can be the characteristic golden-yellow color which is unacceptable for applications which involve color judgment, evaluation or comparison. Thus major indoor applications to date have been industrial areas where color is not important to the process or product identification. Sodium lamps produce light predominantly in the yellow-orange portion of the spectrum and have very little red, blue or green.

High pressure sodium lamps have become, in America, the preferred source for street and highway lighting. Whereas the mercury and metal-halide lamps have arc

tubes made of quartz, the high pressure sodium lamp uses a ceramic arc tube usually polycrystalline alumina which is transparent to visible light when heated. The availability of this new ceramic material made the high pressure sodium lamp possible. This ceramic is necessary in the sodium lamp due to the highly corrosive effect of sodium at the high temperatures involved (1300°C) during operation.

In addition to its high efficiency, major characteristics of the high pressure sodium lamp are its long life and its ability to maintain light output over life. This high level of maintained light output permits the lamp to stay in the socket longer before replacement is required.

The present status of high intensity discharge lamps is that of our most efficient light source. At an efficacy of 140 lumens-per-watt, this source is the most efficient converter of electric energy into near white light -- an efficiency of 40%.

Lamp scientists are busily at work improving our theoretical understanding of the complex nature of the arc discharge in our present lamp systems. The search for new higher temperature envelope materials to replace quartz and alumina is actively being pursued. New combinations and new material suitable for lamp fill are being researched. Lamp arc tube design geometry and its effect on convection currents and nonradiating losses are being studied. Out of this massive effort will surely come the necessary tools to produce a lamp that will approach 200 lumens-per-watt. In my opinion this higher level of performance will be demonstrated within the next five years. Certainly the most lucrative area in which to look for development that will lead us towards our theoretical goal of 250 lumens-per-watt is in the high intensity discharge area.

While investigating gas discharges, Tesla discovered that gases at reduced pressure exhibited super-conductivity. This led Tesla to the invention of electrodeless

discharge lamps inductively coupled to a high frequency power supply. This concept of lamp design is under serious investigation as evidenced by patents recently issued. The electrodeless lamp offers many new opportunities in lamp design because the constraints imposed by electrode performance have been eliminated. We can now use as a fill any material that can be contained by the lamp envelope.

In his book, "The Year 2000", Herman Kahn predicts that our cities will be illuminated by artificial moons. The realization of Kahn's prediction using very high power, high frequency driven electrodeless lamps will be a giant step towards Tesla's goal of a terrestrial lamp.

X. Poglavlje

VISOKOFREKVENTNA TEHNIKA

Prof.dr Boris Kviz
Elektrotehnički fakultet
Unska bb, Zagreb

OPTIČKI VALOVODI U LASERSKIM KOMUNIKACIJAMA

Razmatra se mogućnost vođenja optičkog vala samofokusirajućim valovodom i valovodom s plaštom, kao višemodnim i jednomodnim. Gubici su dani kao apsorpcioni, uslijed raspršenja, nepravilnosti u geometriji i zakrivljenosti. Imajući u vidu izvore i detektore zračenja, te širinu frekvencijskog pojasa prijenosa, navodi se mogućnost realizacije komunikacijskog sustava.

OPTICAL WAVEGUIDES IN LASER COMMUNICATIONS

The possibility of guiding an optical wave by a self-focusing waveguide and a waveguide with cladding, as multimode and monomode, is considered. Losses due to absorption, scattering, geometry and bending are analysed. Bearing in mind the sources and detectors of radiation, and the frequency bandwidth of transmission, the possibilities of communication-system realization are shown.

Iako još u eksperimentalnoj fazi, komunikacije na bazi optičkih valovoda obećavaju velike mogućnosti širokopojasnog prijenosa s malim gubicima. Prva ispitivanja, vezana uz propagaciju modova duž dielektričke šipke još 1910. godine, dovela su tek 1966. godine do prijedloga za korištenje fibera kao prijenosne linije u optičkom

području. Nagli razvojni skok postignut je 1970. godine, kad je proizveden optički valovod ukupnog gušenja od samo 20 dB/km kod valne duljine He-Ne lasera ($0,6328 \mu\text{m}$), da bi danas ta vrijednost bila smanjena ispod 10 dB/km.

Snopovi fibera imaju znatne prednosti pred koaksijalnim kablom u pogledu dimenzija i težine uz iste sposobnosti prijenosa. Njihova fleksibilnost omogućuje jednostavnije instaliranje. Staklo podnosi više temperature okoline (800°C kroz pola sata, čak 1000°C u kraćim intervalima) od električke izolacije, ne podliježe umornosti materijala, a otpornost na koroziju je bolja od bakra. Staklo je, međutim, osjetljivo na ionizirajuće zračenje, koje mu povećava gubitke prijenosa gotovo proporcionalno s dozom zračenja. Nakon nekoliko minuta poslije zračenja dolazi do djelomične regeneracije. Određenim dopiranjem moguće je poboljšati svojstva stakla i u tom pogledu.

Optički valovod omogućuje potpunu izolaciju odašiljača i prijemnika, te ovi ne zahtijevaju zajedničko uzemljenje. Popravke na valovodu moguće je vršiti i u pogonu. Kako takav valovod ne uzrokuje interferentne smetnje u drugim sistemima, niti ga mogu drugi sistemi u znatnijoj mjeri ometati, to mu je značajna primjena u područjima velikih elektromagnetskih polja kao i u atmosferi zapaljivih plinova bez opasnosti po eksploziju.

Sirovina je daleko jeftinija i malo podložna svjetskim krizama u odnosu na bakar. Međutim, velika potrebna čistoća materijala ($1 : 10^6$ do $1 : 10^9$) kao i preciznost izrade mogu cijenu učiniti ekonomskom pri masovnoj proizvodnji.

U toku razvoja diskutirana su dva prijedloga: 1) valovod s lećama ili zrcalima kao periodičkim nizom fokusirajućih elemenata, i 2) valovod sa samofokusirajućim nitima ili sa strukturom jezgre i omotača.

1. Valovod s lećama

Takav valovod moguće je ostvariti periodičkim nizom leća žarišne daljine f i razmaka $L < 2f$, što u pogledu vodjenja snopa odgovara optičkom rezonatoru sa sfernim zrcalima radijusa $R=2f$ na razmaku L . U takvom linearno formiranom vodu snop je vodjen sve dok vrije-

di uvjet stabilnosti rezonatora

$$0 < (1 - L/R_1)(1 - L/R_2) < 1 \quad (1)$$

gdje su R_1 i R_2 radijusi zakrivljenosti zrcala, a L njihov razmak. Na svakoj pojedinoj leći nastaju gubici apsorpcije, refleksije i difrakcije od oko 1%, što uz

razmake leća od po 1m daje gušenje 1 dB/km. Naoko povoljna vrijednost ometana je dodatnim smetnjama (skretanje snopa uslijed temperaturnog gradijenta), praktičkom nemogućnošću zakrivljenja takvog valovoda (dozvoljeni radijus zakrivljenosti reda 30 km) osim pomoću prizmi ili zrcala, potrebnom velikom točnošću podešavanja (reda 10^{-6} u odnosu na promjer) što bi zahtijevalo automatski upravljane držače u pogonu, itd. Tehnička kompliciranost realizacije, a posebno pojava prikladnijih valovodnih niti, čine danas valovod s lećama ili zrcalima povijesnom etapom u razvoju.

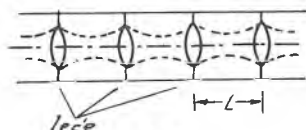
2. Multimodni valovod s postepenom promjenom indeksa refrakcije

Granični slučaj valovoda s idealno tankim lećama, kad razmak između njih teži nuli je tzv. valovod sa samofokusiranjem. Indeks ref-

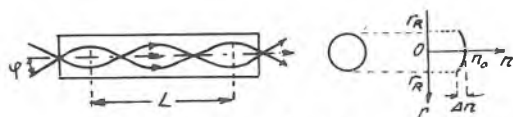
rakcije je maksimalan na osi, te opada kontinuirano prema obodu presjeka, obično po paraboličnom zakonu

$$n = n_0(1 - \frac{1}{2} a^2 r^2) \quad (2)$$

gdje je $a^2 = 1,5 \dots 0,2 \text{ mm}^{-2}$, a razlika indeksa refrakcije na osi i obodu je $\Delta n = 0,012 \dots 0,015$ za danas korištene staklene niti. Zraka



Sl. 1



Sl. 2

koja upada na nit na udaljenosti r_0 od osi i pod kutom φ_0 povija se oko osi s periodom $L=2\pi/a$ prema zakonu

$$r = r_0 \cos az + \frac{r_0}{a\varphi} \sin az \quad (3)$$

Radijalno opadanje indeksa refrakcije od osi uzrokuje povećanje brzine parcijalnih zraka izvan osi valovoda, čime se kompenzira veća dužina puta. Na taj će način svjetlosni snop paralelnih zraka, koji upada na valovod biti periodički fokusiran, a sve će zrake imati približno isto vrijeme proleta kroz nit, bez obzira da li se šire duž osi ili "njišu" oko nje. Relativno velik promjer valovoda u odnosu na valnu dužinu propagiranog svjetla omogućuje takvo razmatranje na osnovi zakona optike, dok valno razmatranje pokazuje da se ovdje, kao kod valovoda s lećama, radi o širenju na osnovi TEM-modova.

Razlika vremena proleta, koja uzrokuje proširenje prenošenog svjetlosnog impulsa dana je sa

$$\Delta t = \frac{L \cdot n_0}{c} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 = \tau \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \quad (4)$$

gdje je L ...dužina valovodne niti, a T ...vrijeme proleta za aksijalnu zraku. Ta razlika je manja nego kod valovoda s omotačem (gdje je proporcionalna s $\Delta n/n_0$), te uz $n_0=1,5$ i $\Delta n/n_0=0,01$ daje proširenje impulsa oko 0,25 ns/km. Odziv na impuls je vrlo ovisan o varijacijama raspodjele indeksa refrakcije, dakle i o njegovim tolerancijama, pa i mala odstupanja od optimalnog profila daju znatna proširenja impulsa. Analiza ostalih profila indeksa pokazala je da profil blizak paraboličnom omogućuje 4 puta kraće vrijeme proširenja impulsa (62,5 ps/km), a tehnika minimiziranja grupnog vremena kašnjenja i disperzije modova čak 1,5 ns/km. Međutim, maksimalno odstupanje indeksa refrakcije od samo $dn_{\max}=10^{-4}$ uz promjenu eksponencijalnog zakona od $d\alpha=0,036$ kod $n_0=1,5$ i $\Delta n=0,01$ daje gotovo osmerostruko proširenje impulsa (od 62,5 na 494 ps/km).

Profil indeksa refrakcije odstupa od idealnog, pa kod ja-

čih zakrivljenosti dolazi do većih ili manjih razlika u vremenu proleta za različite modove. Da bi ostalo sačuvano svojstvo vođenja optičkim valovodom, njegov radijus zakrivljenosti za jedno zakrivljenje ne smije biti manji od

$$R > \frac{2}{a^2 c_R} \quad (5)$$

a koji kod višekratnog mijenjanja zakrivljenosti po veličini i smjeru postaje daleko veći.

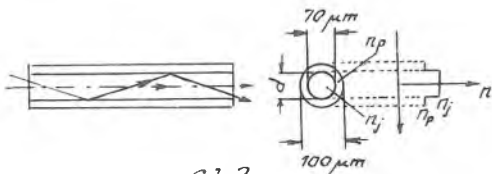
Svojstva vođenja snopa valovoda s kontinuiranom promjenom indeksa refrakcije (tzv. gradijentnih niti, odnosno SELFOC-valovoda) ne obećavaju veće perspektive za duže trase optičkih komunikacija. Na kraćim trasama pokazala su se dobrima. Takvi valovodi lako se sprežu na izvor i međusobno, a opremljeni koničnim nastavcima omogućuju prijelaze među različitim presjecima. Novi razvoj omogućio je sniženje gušenja trase komercijalnih valovoda ispod 100 dB/km, a postignute laboratorijske vrijednosti su od 20 do 50 dB/km kod 850 nm. Produkt širine pojasa i dužine trase bit će vjerojatno ograničen na 500...1000 MHz·km uz korištenje laserskog izvora. Svjetleće diode (LED) uslijed disperzije materijala imat će navedeni produkt mnogo niže vrijednosti, 200...300 MHz·km.

3. Multimodni valovod sa stepeničastom promjenom indeksa refrakcije

Skok indeksa refrakcije kod ovakvog valovoda ostvaren je cilindričnom jezgrom indeksa refrakcije n_j , koja se nalazi u plaštu nešto nižeg indeksa $n_p = n_j - \Delta n$.

Pri tome je $\Delta n/n_j \approx 0,5...5\%$. Kako je promjer jezgre d velik u

odnosu na valnu duljinu svjetla, moguće je propagaciju promatrati geometrijsko-optički, uz višekratne totalne refleksije na graničnoj plohi jezgra-plašt, a pod raznim kutovima upada. To ujedno



Sl. 3

znači da će rasprostiranje vršiti u više modova, i to ne samo jezgrom, već ovisno o tipu moda i promjeru jezgre, većim ili manjim dijelom i plaštem. Plašt služi ne samo za mehaničku zaštitu jezgre nego i preuzima prijenos dijela svjetlosti. Zato debljina plašta mora biti tolika da intenzitet vala na njegovom obodu bude zanemarljiv. Debele jezgre ($20...70\mu\text{m}$) zahtijevaju tanke plaštove ($2...10\mu\text{m}$) i obratno.

Rješavanje jednadžbi cilindričnog dielektričnog valovoda pokazuje da je njime moguće širenje vala u 4 tipa modova, različitih komponenti polja u smjeru širenja. To su $\text{TM}_{0,m}$ -mod s električkom, $\text{TE}_{0,m}$ -mod s magnetskom, te hibridni $\text{HE}_{n,m}$ - i $\text{EH}_{n,m}$ -modovi s električkim i magnetskim komponentama polja u smjeru rasprostiranja. Kako valovod predstavlja visokofrekvencijski propust, to će za razliku indeksa refrakcije $\Delta n = n_j - n_p$ između jezgre i plašta biti moguće rasprostiranje modova, za koje je promjer jezgre veći od graničnog d_g , gdje je

$$d_g = \frac{u_{n,m} \cdot \lambda}{\pi \sqrt{n_j^2 - n_p^2}} \quad (6)$$

što se alternativno za dani promjer može izraziti eksplicitno graničnom valnom duljinom λ_g ili graničnom frekvencijom moda f_g . Ovdje je $u_{n,m}$ granični parametar (tzv. normalizirana frekvencija) ovisan o tipu moda, koji za pojedine najniže modove cilindričkog valovoda s jezgrom i plaštom iznosi

$\text{TE}_{0,m}$:	$u_{01}=2,405$	$u_{02}=5,52$	
$\text{TM}_{0,m}$:	$u_{01}=2,405$	$u_{02}=5,52$	
$\text{HE}_{1,m}$:	$u_{11}=0$	$u_{12}=3,83$	$u_{13}=7,02$
$\text{HE}_{2,m}$:	$u_{21}=2,405$	$u_{22}=5,52$	
$\text{EH}_{1,m}$:	$u_{11}=3,83$	$u_{12}=7,02$	
$\text{EH}_{2,m}$:	$u_{21}=5,15$	$u_{22}=8,42$	

Uz pretpostavljene vrijednosti $\lambda=1\mu\text{m}$, $n_j=1,51$, $n_p=1,50$ (tipične vrijednosti za staklo) i promjer jezgre $40...50\mu\text{m}$ bit će moguće

rasprostiranje oko 1000 modova.

Istovremeno rasprostiranje u više modova, te tzv. valovodna disperzija uslijed različitih karakteristika prijenosa pojedinih frekvencija čak i u jednom modu, i disperzija materijala jezgre i plašta uzrok su razlikama u vremenu proleta, što ima za posljedicu izobličenja pri prijenosu. Razlika vremena proleta dviju valnih grupa v_{g1} i v_{g2} je

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{v_{g1}} - \frac{1}{v_{g2}} \right) = \frac{L \cdot \Delta v_g}{v_{g1} v_{g2}} \quad (7)$$

što za slučaj rasprostiranja dviju frekvencijskih grupa u jednom modu ima oblik

$$\Delta t = \frac{L}{v_g^2} \frac{dv_g}{df} \Delta f \quad (8)$$

Faktor $\frac{dv_g}{df}$ predstavlja disperziju, koja se sastoji od valovodne za određeni mod i materijalne. Kod višemodnih niti materijalna disperzija je zanemariva u odnosu na valovodnu. Za $\Delta n/n_j = 1\%$ mogu razlike vremena proleta iznositi do 30 ns/km, uz pretpostavku širenja svim, jednako gušenim modovima, bez njihove međusobne pretvorbe. Realno imaju modovi manja ili veća kašnjenja grupirana oko neke srednje vrijednosti, pa će maksimalno proširenje impulsa biti znatno manje od navedenog iznosa.

Kod optičko-geometrijskog promatranja razlike vremena proleta najbrže (aksijalne) i najsporije (blizu graničnog kuta φ totalne refleksije, uz $\sin \varphi \approx 1 - \Delta n/n_j$) zrake dobivamo

$$\Delta t = \frac{L \cdot n_j}{c} \cdot \frac{\Delta n}{n_j} = T \frac{\Delta n}{n_j} \quad (9)$$

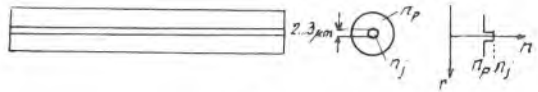
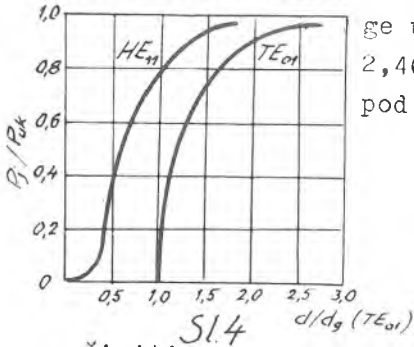
gdje je L dužina valovoda, T vrijeme proleta za aksijalnu zraku, a što daje isti rezultat.

Proširenje impulsa dalo bi se umanjiti smanjenjem razlike indeksa refrakcije, čime se međjutim smanjuje efikasnost hvatanja svjetlosti od izvora s velikim kutom zračenja, a istovremeno se gubi definiranost granične plohe jezgra-plašt. Zato $\Delta n/n_j$ ne bi smjelo biti manje od 0,5%. Na velikim daljinama prijenosa širina pojasa multimodnog valovoda bit će nešto veća od očekivane, prema gor-

njem računu, uslijed konverzije modova, tj. prebacivanja svjetlosne snage iz sporijih u brže zrake i obratno. Produkt udaljenosti i širine pojasa praktičkih valovoda ograničen je na iznos 10...100 MHz·km, što bi uz razmak repetitora od 10 km značilo samo nekoliko MHz širine pojasa.

4. Monomodni valovod

Na sl.4 prikazana je valovodna disperzija za najniže modove multimodnog valovoda. Na apscisi je omjer promjera i graničnog promjera a na ordinati omjer svjetlosne snage vodjene jezgrom i ukupne snage u valovodu. Prema jedn.(6) uvrštenjem $u_{01} = 2,405$ dobivamo granični promjer $d_g(\text{TE}_{01})$, ispod kojeg $[d < d_g(\text{TE}_{01})]$ će se svjetlosna sna-



Sl.5

ga širiti samo osnovnim modom HE_{11} . Takve optičke valovode zovemo monomodnima. Granični promjer $d_g(\text{TE}_{01})$ je obično reda nekoliko λ , pa se monomodni valovod izvodi prema sl.5. Iz sl.4 također je vidljivo da se smanjenjem promjera sve veći dio svjetlosti potiskuje iz jezgre u plašt. Time se smanjuje sposobnost propagacije u valovodu, te na zakrivljenjima treba računati s gubicima.

U pogledu valovodne disperzije za $\Delta n/n_j = 0,5\%$ bit će $\left(\frac{dv_g}{df}\right)_{\text{val}} \approx 10^{-9} \text{ms}^{-1} \text{Hz}^{-1}$, te je ona mala u odnosu na materijalnu disperziju, koja je reda $10^{-8} \text{ms}^{-1} \text{Hz}^{-1}$. Na temelju jedn.(8) moguće je uvrštenjem $v_g \approx \frac{c}{n}$ odrediti razliku vremena proleta za određenu širinu pojasa Δf zračenja. Tako će, na primjer, laserski GaAs izvor relativne širine pojasa 0,1% dati razliku vremena proleta dviju, za $\Delta \nu$ različitih grupa frekvencija u monomodnom valovodu uslijed materijalne

disperzije, od 0,1 ns/km. Proširenje impulsa je dakle oko 1 ns/km za svakih 1% relativne širine pojasa zračenja.

Materijalna disperzija i širina pojasa odašiljača određuju širinu pojasa prijenosa takvog valovoda. Za jednomodni laserski izvor može se očekivati produkt 10...50 GHz·km. Praktički GaAlAs laser daje, međutim, više modova u spektralnoj širini oko 3 nm, što će dati produkt širine pojasa i daljine još uvijek od 2...3 GHz·km.

5. Gubici optičkih valovoda

Gubici u optičkim valovodima potječu zbog više razloga, koji se često javljaju istovremeno. To su: apsorpcija svjetlosti, raspršivanje na nehomogenostima (zrnca prašine ili mjehurići zraka) u materijalu, odstupanje valovodne geometrije (proširenja i suženja jezgre) i zračenje na zakrivljenjima.

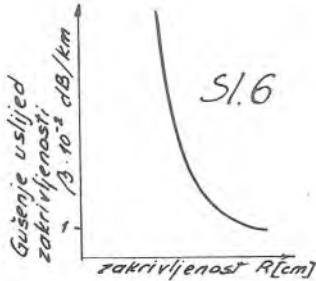
Gubici apsorpcije nastaju uglavnom uslijed iona metala, iona OH skupine i vode.

Raspršivanje nastaje uslijed nehomogenosti nastalih procesom izvlačenja ili već sadržanih u materijalu. To tzv. Rayleighovo raspršivanje proporcionalno je s λ^{-4} , dakle značajnije je na kraćim valnim dužinama. Najbolja svojstva u tom pogledu ima kvarcno staklo. Kao dodatno javlja se raspršivanje u smjeru prema naprijed. Nekadašnji veliki gubici nastali nesavršenošću granične plohe jezgra-plašt pri prevlačenju plašta danas su znatno smanjeni novijim tehnikama izvlačenja.

Odstupanja geometrije uzrokovat će velike gubitke intenziteta, ukoliko su reda veličine promjera jezgre, što kod monomodnih valovoda znači reda veličine valne dužine. Posljedica će biti zračenje u okolni prostor, a kod multimodnih valovoda i konverzija modova. Eksponencijalne promjene promjera uzrokuju manje gubitke od linearnih, osobito na većim dužinama, npr. za dužinu 50d gubici su 1%, a za dužinu 500d (što odgovara ~1mm) su 1‰, gdje

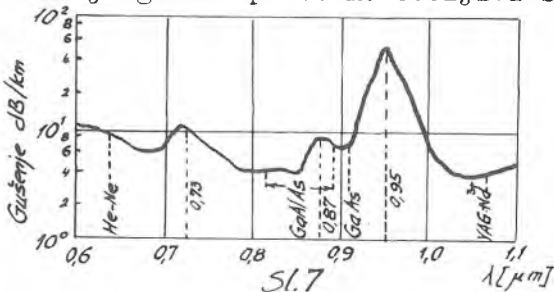
je d promjer valovoda.

Gubici na zakrivljenjima su zanemarivi, osim za vrlo male radijuse zakrivljenosti, kada naglo rastu. To se može i očekivati, jer kritični radijus ovisi o graničnom parametru (normaliziranoj frekvenciji) $u_{n,m}$, kojeg smanjenje uzrokuje, osobito kod monomodnih valovoda, sve veće vodjenje vala plaštom. Na sl.6 prikazan



je gubitak uslijed zakrivljenosti. On varira približno sa $e^{-\delta R}$, gdje konstantu δ određuju parametri valovoda. Za monomodne valovode povoljno je odabrati promjer jezgre nešto ispod graničnog $d_g(TE_{01})$, kada je rasprostiranje pretežno jezgrom, pa su omogućeni mali radijusi zakrivljenosti, reda lmm, što je, međutim, čvrstoćom materijala ograničeno na nekoliko mm.

Na sl.7 prikazan je primjer ukupnog gušenja optičkog valovoda s jezgrom i plaštom. Uočljiva su tri tipična maksimuma gušenja



na 0,73, 0,87 i 0,95 μm . Veliki dio krivulje je, međutim, ispod 10 dB/km, a pojedina područja čak ispod 5 dB/km. Valne dužine tipičnih laserskih izvora označene su na apscisnoj osi.

Osim navedenih gubitaka javljaju se i dodatni kod sprezanja valovoda međusobno kao i na izvor zračenja. Kod monomodnih valovoda tolerancije sprezanja su uže, te npr. 0,4 dB gušenja sprezanja može biti uzrokovano razmakom krajeva valovoda od 7,5 μm , ili razmakom osi valovoda od 0,5 μm , ili kutom medju osima valovoda od 1,2°, sve uz pretpostavku promjera moda od 2,5 μm . Problem spajanja monomodnih valovoda još je u fazi rješavanja. Kod multimodnih valovoda tolerancije su za

red veličine veće, pa se sprezanje može izvršiti preciznim držačima krajeva valovoda s kapilarnim cijevima ili utorima oblika V. Sprezanje na poluvodički laser jednostavnim dotikom omogućuje efikasnost sprezanja 15...30%. Malim lećama adaptiran izlaz lasera na multimodni valovod omogućuje efikasnost do 80%, a u slučaju monomodnih valovoda do 70%. Svjetleće diode (LED) zahtijevaju veliku površinu sprezanja zbog malog intenziteta svjetla, pa je potreban multimodni valovod. Unatoč maloj efikasnosti sprezanja od par % i maloj ukupnoj efikasnosti, LED diode imaju perspektivu zbog relativno dobre tehničke razvijenosti i pouzdanosti.

6. Optički izvori i detektori za valovodne komunikacije

Najveću perspektivu svjetlosnog izvora u valovodnim komunikacijama ima poluvodički laser, kako zbog jednostavnosti tako i ekonomičnosti. Male dimenzije, robusnost, jednostavna i linearna interna modulacija strujom, velika kvantna efikasnost (do 40%), velika širina pojasa (reda GHz), kontinuirana svjetlosna snaga reda 10 mW, a impulsna reda 100 W, su neke od njegovih glavnih prednosti, značajnije od mana, kao što su relativno velika širina pojasa 2,5 nm i veliki kut divergencije snopa od 20° . Male dimenzije njegove rezonantne šupljine (par stotina μm) omogućuju njegovo korištenje i u integriranim optičkim krugovima. GaAs laser u homostrukтури zahtijeva velike gustoće struje praga kod sobne temperature (reda 50000 A/cm^2), što uvjetuje nisku opteretivost čak i u impulsnom radu. GaAlAs laser u jednostrukoj heterostrukturi ima manje unutarnje gubitke, a time i manju struju praga od 8000 A/cm^2 . Dvostruka heterostruktura suženjem aktivnog sloja, zahtijeva gustoće struje oko 1000 A/cm^2 te omogućuje rad i na sobnoj temperaturi, ali uz povećanu divergenciju snopa od 40° . Strukture s velikom optičkom šupljinom (LOC-diode) imaju prošireno područje emitiranja, a time i veću vršnu snagu, uz sniženu struju praga (1700 A/cm^2)

te snop od 20° kao kod homostrukture.

Uz sobnu temperaturu i relativno veliko opterećenje poluvodički laseri imaju kratki vijek od par 1000 sati. Valna dužina zračenja može se izborom i dopiranjem poluvodiča postići u području $0,7 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$ time da je ona za GaAs laser kod $0,9 \mu\text{m}$, a s dodatkom aluminijske blizu $0,8 \mu\text{m}$.

Svjetleće LED diode kao nekoherentni izvori imaju veću divergenciju snopa uz širinu pojasa od par desetaka MHz.

Plinski laseri na višem su stupnju razvijenosti, stabilni su, uske spektralne širine i velike koherencije (He-Ne, CO_2 -laser), zahtijevaju, međutim, vanjske modulatore, što im ograničuje primjenu. Optički pumpani YAG:Nd^{+3} iz grupacije krutih lasera dolazi u obzir zbog CW snage reda kW kod sobne temperature. Svi navedeni laseri su u području nižeg gušenja valovoda sa sl.7.

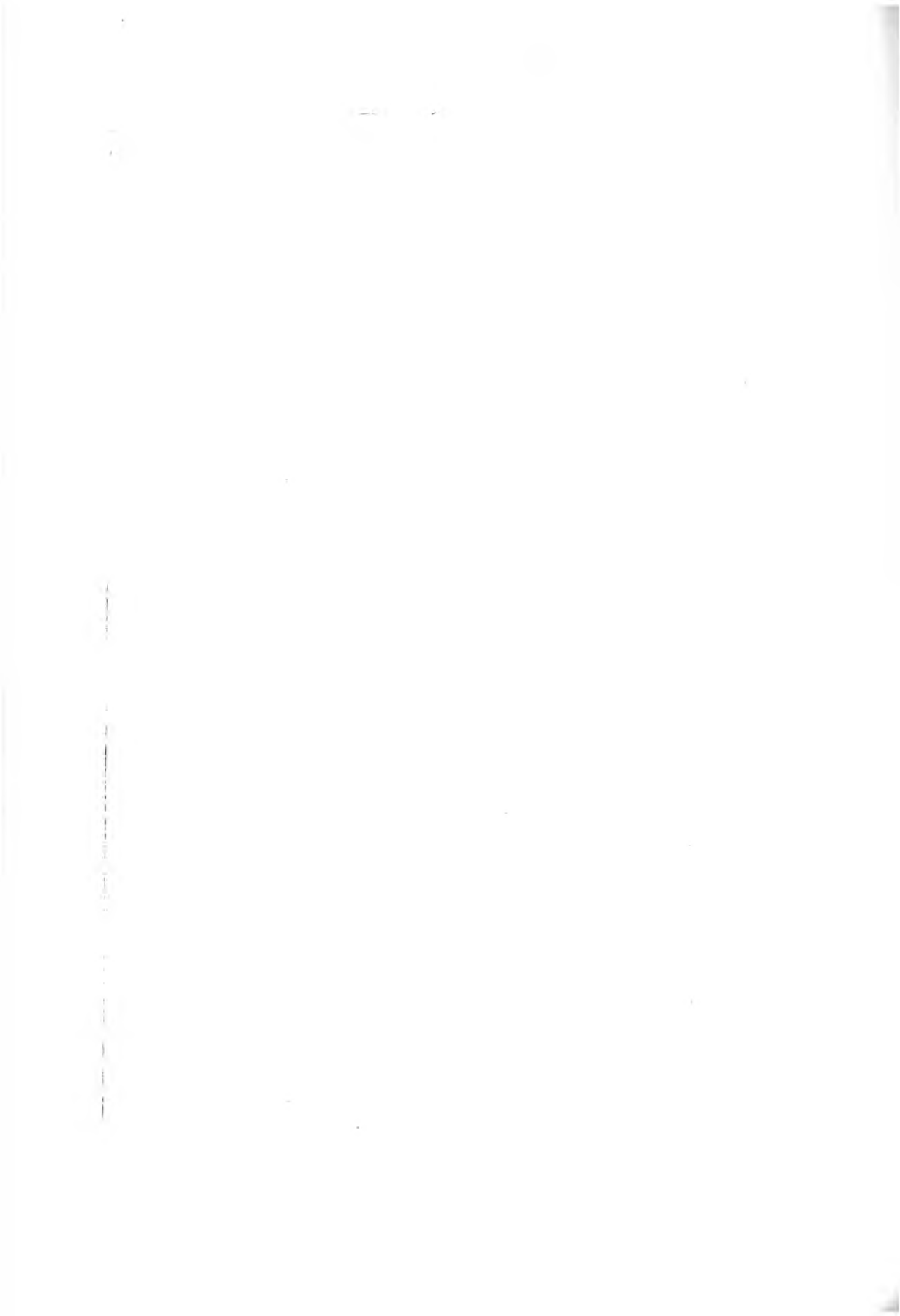
Kao detektori prikladna su dva tipa silicijskih dioda: PIN dioda i naročito avalanche-dioda. Avalanche-dioda daje strujno pojačanje umnažanjem nosilaca naboja njihovim ubrzanjem i ionizacijom sudarima. Proces je malošumni, pa se dobiva znatno uzdizanje slabih fotostruja u odnosu na termički šum.

7. Komunikacijski sustav s optičkim valovodom

Danas možemo računati s dozvoljenim gušenjem između pojačala od 45 dB, pa će njihov razmak biti nekoliko km. Predviđa se korištenje ICM-širokopojasnih i analognih, uskopolasnih sustava. Velike širine pojasa moguće je dobiti snopom valovoda; s 300 niti u zajedničkom kabelu moguć je prijenos 70000 telefonskih krugova u multimodnom, a čak oko 2 milijuna u monomodnom sustavu na 1 km. Ne ulazimo pri tome u velike mogućnosti prijenosa video-signala, pa čak snimanja i prijenosa televizijske slike u optičkoj domeni, bez optičko-električne konverzije.

Literatura

1. Gallawa R.L.: Optical waveguide technology; World Telecommunication Forum, Geneva 6.-8.X.1975, str.1321-1326;
2. Gallawa R.L.: Optical waveguide technology for modern urban communications; IEEE Trans.on Communications, No.1, str.131-142, 1975;
3. Hoth D.: Broad-band media for urban communications, IEEE Trans. on Comm., No.1, str.121-131, 1975;
4. Kao K.C., Collier M.E.: Fibre-optic systems in future telecommunication networks; World Telecomm.Forum, Geneva 6.-8.X.1975, str.1311-1316;
5. Maslowski S.: Optical fibre transmission - Single mode vs multimode; World Telecomm.Forum, Geneva 6.-8.X.1975., str.1331-4;
6. Rosenberger D.: Technische Anwendungen des Lasers; Springer-Verlag Berlin, 1975;
7. Treheux M.: Performances des systemes de transmission numerique sur fibres optiques; World Telecomm.Forum, Geneva 6.-8.1975, str.1341-1344.



Mr Borivoj Modlic, dipl.ing.
Zavod za visokofrekventnu tehniku
Elektrotehnički fakultet Zagreb

PRIJENOS I OBRADA SIGNALA NESINUSNIM FUNKCIJAMA U SUVREMENIM RADIOKOMUNIKACIJAMA

Referat analizira svrhu uvođenja nesinusnih funkcija u procese prijenosa i obrade signala u radiokomunikacijama kao i rezultate takovih postupaka. Primjenjene metode se oslanjaju na već uobičajene postupke s trigonometrijskim funkcijama, ali se temelje na nekom drugom ortogonalnom sustavu. U referatu se posebno obrađuju slučajevi s Rademacherovim, Walsh, Haar-ovim i nekim drugim funkcijama. Analiziraju se svojstva diskretnih signala u tom području. Zatim se razmatra problem smanjenja zalihosti u nekim tipovima signala kao što je npr. video signal. Ukazuje se na rezultate koje na tom polju daje obrada Walsh funkcijama.

SIGNAL TRANSMISSION AND PROCESSING WITH NON-SINUSOIDAL FUNCTIONS IN MODERN RADIOCOMMUNICATIONS

The introduction of non-sinusoidal functions in signal transmission and processing techniques used in radiocommunications serves a number of purposes. The methods applied rely on standard trigonometric function techniques but use a different orthogonal system. Special cases include Rademacher, Walsh, Haar and some other functions. Typical fields of study comprise analyses of discrete signal characteristics, and redundancy reduction in some types of signals, e.g., image signals. The results obtained by Walsh transform processing are discussed.

1. Uvod

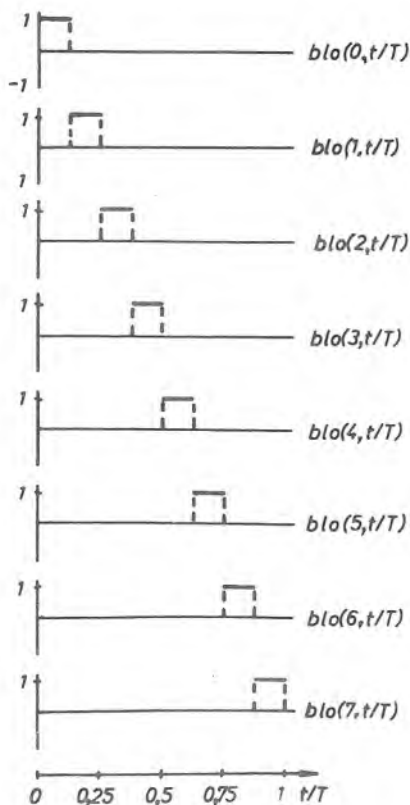
Prijenos vijesti i podataka oduvijek je igrao značajnu ulogu u životu čovjeka. Prve elektroničke metode komuniciranja osnivale su se na nesinusnim valnim oblicima. To su bili impulsi generirani mehaničkim putom. Već i u to doba bila je razvijena teorija sinusnih funkcija kao i Fourierova analiza, ali tehnološki stupanj razvoja onemogućavao je uporabu ovih metoda za realizaciju konkretnih uređaja. Do tog se stadija došlo nešto kasnije, kad su se gradnjom rezonantnih krugova i elektronskih cijevi generirali signali sinusnog valnog oblika.

Istovremeno se razvijaju sklopovi za obradu sinusnih tipova signala kao što su razni filtri, pojačala i sl. Osnov ove tehnike čine dakle linearni, vremenski nepromjenljivi elementi. Dominacija sinusnih funkcija u komunikacijama još uvijek nije prekinuta, iako se za neke svrhe sve više rabe i drugi valni oblici.

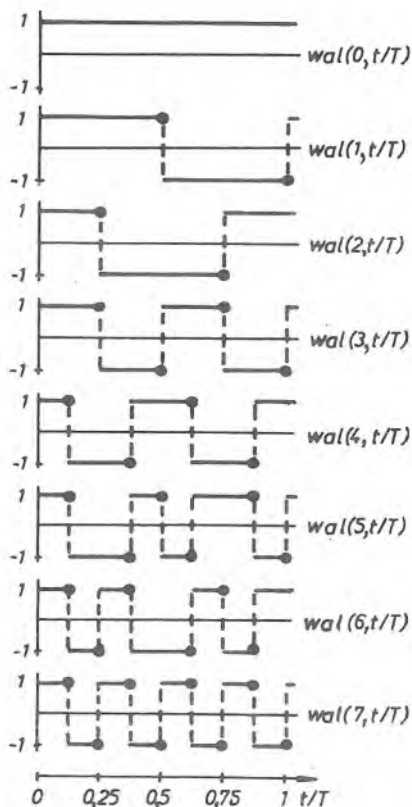
Veliki korak naprijed znači pojava poluvodičkih elemenata, kojom su otvorene široke mogućnosti razvoja, između ostalih i radiokomunikacijske tehnike. Ovime je omogućena primjena nekih drugih ortogonalnih funkcija, pored trigonometrijskih, a na njima vrlo sličan način. Iako su ove metode već ranije teoretski razrađene, njihova je primjena novijeg datuma.

2. Sustavi ortogonalnih funkcija u radiokomunikacijama

Uz trigonometrijske funkcije sinusa odnosno kosinusa u radiokomunikacijama značajnu ulogu igraju pravokutni impulsi (slika 1).



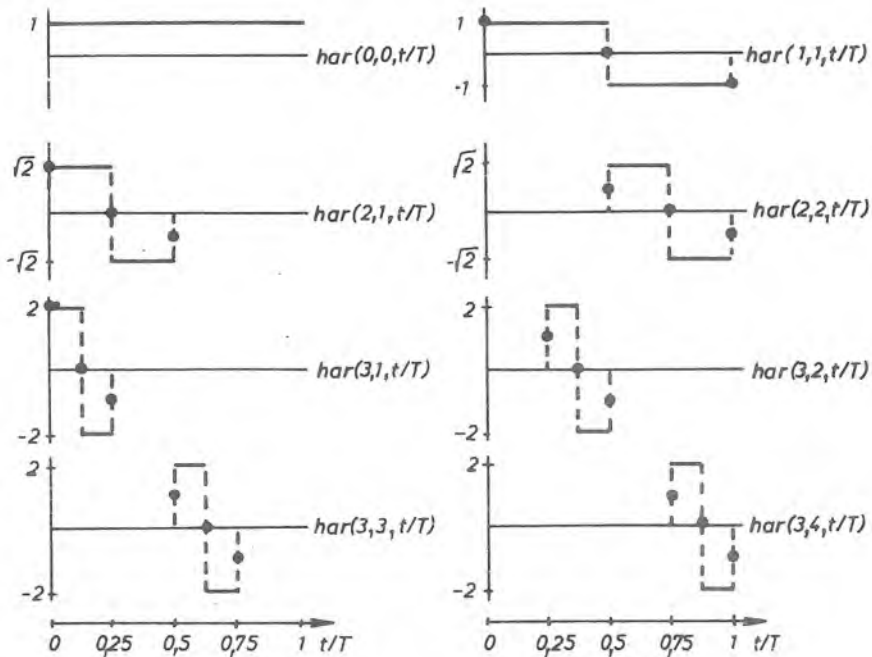
Slika 1



Slika 2

Oni dolaze do izražaja u digitalnim prenosnim sustavima, a već i po svojoj izvornoj strukturi predstavljaju temelj vremenske podjele u sustavima za višekanalni prijenos informacija.

Znatno kompleksniji, po svom karakteru, je sustav Walsh funkcija (slika 2)./U točkama diskontinuiteta kao vrijednost funkcije uzima se lijevi limes./ Mnogi ih znanstvenici smatraju digitaliziranim trigonometrijskim funkcijama, jer su mnoga svojstva tih dvaju sustava u velikoj mjeri slična. Praktičnost uvođenja takovih valnih oblika u proces obrade signala dolazi naročito do izražaja kod diskretnih signala. Mnoga se svojstva diskretnih signala mogu znatno jednostavnije obuhvatiti Walsh funkcijama, a i realizacija odgovarajućih sklopova ne predstavlja neki veći problem, dapače ona je vrlo jednostavna. Upravo to svojstvo čini Walsh funkcije posebno zanimljivima.



Slika 3

Treći značajniji sustav čine Haar-ove funkcije (slika 3). Za razliku od Walsh funkcija, u točkama diskontinuiteta kao vrijednost funkcije uzima se aritmetička sredina lijevog i desnog limesa.

Rezultati, koji se postižu obradom Haar-ovim funkcijama, nešto su slabiji u usporedbi s rezultatima obrade Walsh funkcijama. One, međutim, dolaze do izražaja u nekim specijalnijim slučajevima, kada se postupku obrade želi podvrći signal u samo nekim ograničenim vremenskim intervalima koji se periodički javljaju u vremenu.

3. Analiza i sinteza signala Walsh i Haar-ovim funkcijama

Neki signal proizvoljnog valnog oblika $s(t)$ /jedinici uvjet koji se postavlja na signal jest da je integral kvadrata funkcije $s(t)$ konačan/ određen je u području Walsh funkcija nizom koeficijenata $a(j)$ tako da je u intervalu $(0, T)$

$$s(t) = \sum_{j=0}^{\infty} a(j) \cdot \text{wal}(j, t/T) \quad (1)$$

gdje je $a(j)$ jednako,

$$a(j) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) \cdot \text{wal}(j, t/T) \cdot dt \quad (2)$$

I u ovom se slučaju može ekvivalentno Fourierovoj analizi izvesti Parsevalov teorem, koji tvrdi da je ukupna snaga signala $s(t)$ jednaka zbroju snaga pojedinih Walsh komponenata, odnosno

$$\int_0^T s^2(t) \cdot dt = \sum_{j=0}^{\infty} a^2(j) \quad (3)$$

Ako se beskonačni red (1) ograniči na samo konačni broj članova, onda se javlja odstupanje između izvornog signala $s(t)$ i signala $\hat{s}(t)$ koji je dobiven konačnom sumom iz (1). Veličina odstupanja mjeri se srednjom kvadratnom pogreškom $\mathcal{E}$,

$$\mathcal{E} = \int_0^T \left[s(t) - \sum_{j=0}^m a(j) \cdot \text{wal}(j, t/T) \right]^2 \cdot dt \quad (4)$$

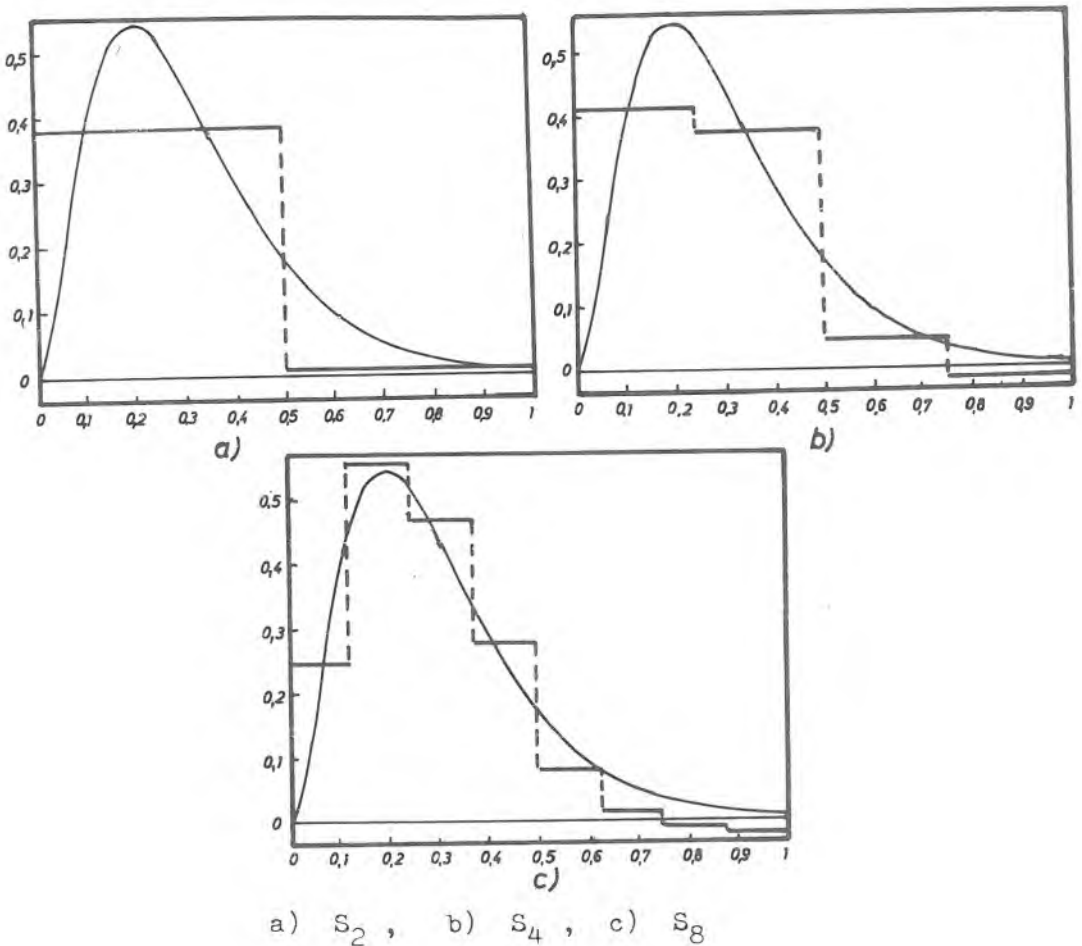
Aproksimacija signala $s(t)$ konačnim redom Walsh funkcija, koja odgovara $\hat{s}(t)$, diskretnog je oblika zbog diskretne forme samih Walsh funkcija.

Uzmimo kao primjer signal određen funkcijom $s(t) = 100 \cdot t^2 \cdot e^{-10 \cdot t}$. Signal $s(t)$ aproksimirat ćemo redom Walsh funkcija prema (1) s time da se ograničimo na konačan broj članova reda.

Pripadni koeficijenti $a(j)$ određuju se pomoću (2), a ako kao interval analiziranja uzmemo jedinični vremenski interval $(0,1)$ onda su pripadni koeficijenti jednaki,

$$\begin{array}{ll} a(0) = 0,19945 & a(4) = -0,05475 \\ a(1) = 0,18708 & a(5) = -0,06823 \\ a(2) = -0,00998 & a(6) = -0,02562 \\ a(3) = 0,02479 & a(7) = -0,00590 \end{array}$$

Postepeni postupak sinteze ilustriran je na slici 4.



Slika 4

Indeks k simbola S_k označava broj članova reda Walsh funkcija kojim je određen $s(t)$ odnosno,

$$S_k = \sum_{j=0}^{k-1} a(j) \cdot \text{wal}(j, t) \quad (5)$$

Analiza i sinteza signala može se na sličan način provesti i u području Haar funkcija. U tom je slučaju,

$$s(t) = c(0) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{2^{j-1}} c(j, n) \cdot \text{har}(j, n, t/T) \quad (6)$$

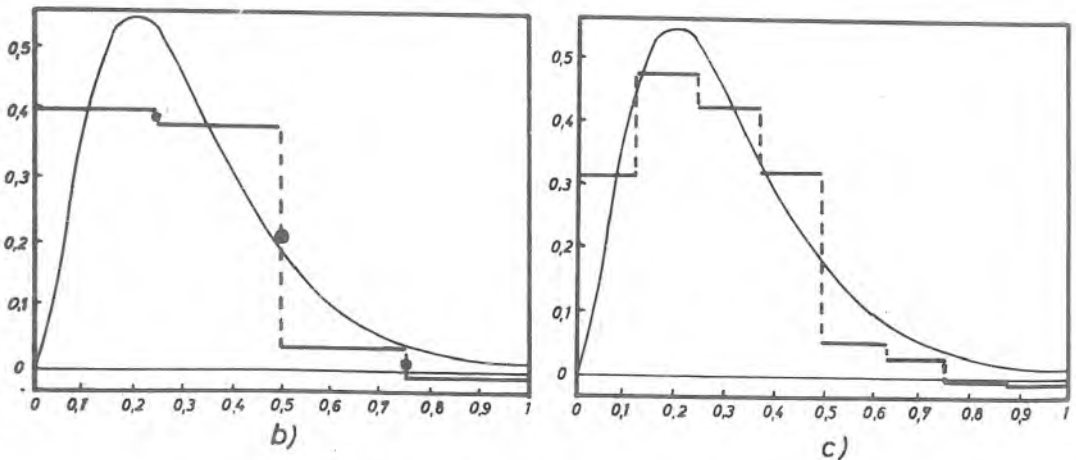
gdje je,

$$c(j, n) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) \cdot \text{har}(j, n, t/T) \cdot dt \quad (7)$$

$$c(0) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (7a)$$

Koeficijenti $c(j, n)$ u potpunosti određuju $s(t)$. Za slučaj reda s konačnim brojem članova javlja se odstupanje između $\hat{s}(t)$, koji je određen konačnim brojem članova reda (6) i izvornog valnog oblika signala $s(t)$. Ove ćemo odnose ilustrirati na već spomenutom primjeru. Koeficijenti reda Haar-ovih funkcija iznose,

$c(0)$	$= 0,19945$	$c(3,1)$	$= -0,07724$
$c(1,1)$	$= 0,18708$	$c(3,2)$	$= 0,04986$
$c(2,1)$	$= 0,01047$	$c(3,3)$	$= 0,00850$
$c(2,2)$	$= 0,02458$	$c(3,4)$	$= 0,00312$



b) S_4 , c) S_8

Slika 5

Pri čemu je u ovom slučaju,

$$S_{2^k} = c(0) + \sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^{2^{j-1}} c(j,n) \cdot \text{har}(j,n,t) \quad (8)$$

Dva slučaja prikazana su na slici 5 b), odnosno c), dok je a) slučaj identičan onome kod Walsh funkcija tako da dijagram za S_2 odgovara dijagramu sa slike 4 a).

Ovaj primjer nameće usporedbu metoda sinteze signala Walsh i Haar-ovim funkcijama. Očito je da je za istu srednju kvadratnu pogrešku potreban veći broj članova Haar-ovog reda. Taj zaključak stoji samo u slučajevima kada je veličina signala, koji se aproksimira, u cijelom analizirajućem intervalu različita od nule, a sinteza se obavlja u čitavom vremenskom intervalu $/(0,1)$ u navedenom primjeru/. Prema tome Haar-ovim se funkcijama daje prednost pri lokalnoj analizi, odnosno sintezi signala, dok su Walsh funkcije pogodnije za globalnu obradu signala.

4. Obrada signala Haar-ovim funkcijama

U procesu prijenosa signala vrlo pogodno se pokazala metoda kodiranja signala Haar-ovim funkcijama. Kod nekih je valnih oblika ovaj postupak posebno efikasan jer se na taj način povećava neosjetljivost prenosnog sustava na smetnje. Uporaba Haar-ovih funkcija u višekanalnom prijenosu rezultira jednim multipleksom, koji se nalazi negdje između vremenskog i sekventnog multipleksa, osnovanog na sustavu jediničnih impulsa, odnosno Walsh funkcija. Šira uporaba Haarovih funkcija donekle je ograničena složenošću postupka generiranja. Ta je konstatacija samo relativna, jer je generiranje Haar-ovih funkcija složenije od generiranja sinusnih, pravokutnih odnosno Walsh signala, ali samo po sebi to ne predstavlja neki veći problem.

5. Obrada signala Walsh funkcijama

Walsh su funkcije znatno češće zastupljene u procesima obrade signala u odnosu na Haar-ove funkcije. Osim metode kodiranja signala, koja je analizirana u prethodnom odjeljku, na ovom je mjestu potrebno spomenuti jednu specifičnu metodu digitalne obrade video signala. U cilju smanjenja broja bita digitaliziranog video signala, rabe se transformacione metode sma-

njenja zalihosti u video signalu. Ovaj se postupak sastoji od slijedećeg: ograničeni element TV slike podvrgava se Walsh transformaciji, zatim se nastavlja proces digitalizacije s nejednolikim vrednovanjem pojedinih komponenti. Rezultat ovakvog postupka je manji broj digitalnih znakova kojima je određen video signal. To smanjenje može iznositi čak i do 50% u usporedbi s klasičnom PCM metodom.

U multipleksnom prijenosu informacija Walsh funkcije čine osnovu tzv. sekventnog multipleksa. Procesi generiranja multipleksnog signala su raznoliki i ne oslanjaju se samo na modulacione postupke /modulacija amplitude, modulacija vremenske baze, modulacija vremenske odgode/ koji su ekvivalentni modulaciji amplitude, frekvencije ili faze u sinusnoj tehnici.

Kao posebnu zanimljivost spomenuo bih metodu generiranja multipleksnog signala na principu većinske odluke koja se rabi isključivo pri prijenosu digitalnih signala. Signali pojedinih kanala kodiraju se najprije pripadnom Walsh funkcijom, a zatim se u svakom trenutku određuje koji je znak više puta zastupljen u svim kanalima. Samo znak, koji preteže, se prenosi. Rekonstrukcija signala na prijemnoj strani osniva se na korelacionom postupku. Ova je metoda prikladna za prenosne sustave s manjim brojem kanala, jer omogućava automatsku korekciju pogreške prijenosa u slučajevima kada svi kanali nisu zauzeti. Ovakovom se obradom u multipleksnom signalu stvara zalihost koja je to veća što je manji broj aktivnih kanala, a ona omogućuje korekcije pogrešaka koje nastaju pri prijenosu. U slučajevima potpune zauzetosti, svojstva ovakvog prenosnog sustava su tek nešto malo slabija u odnosu na sustave koji rabe klasičnu vremensku podjelu.

6. Simulacija digitalne obrade signala na elektroničkom računalu

Pri analizi i projektiranju radiokomunikacijskih sustava, koji rabe ranije spomenute metode obrade signala, vrlo je efikasan postupak u kojem se rabi elektroničko računalo za simulaciju procesa obrade.

Pri tome je često potrebno obavljati Fourierovu, Walsh-Hadamardovu, odnosno Haar-ovu transformaciju. Izravna uporaba relacija, kojima su te operacije definirane, dosta je nepraktična jer zahijeva obavljanje većeg broja operacija integriranja za što je potrebno prilično dugo vremena, ako se radi o transformaciji većeg opsega. Diskretizacijom valnog oblika signala po vremenu postiže se slijedeće: integrali u postupcima transformacije prelaze u sume, čime se postiže znatna ušteda u vremenu računanja. Osim toga u računskim operacijama, pomoću kojih se određuje amplituda komponenti transformiranog signala, postoji znatna zalihost. Mnoge se istovrsne računske operacije više puta ponavljaju pri određivanju različitih komponenti transformiranog signala. Za eliminaciju tih ponavljanja rabi se metoda određivanja međurezultata koji se onda rabe u više navrata. Na taj se način znatno smanjuje potreban broj računskih operacija. Na osnovama izloženih principa osnivaju se algoritmi brze Fourierove, Walsh, odnosno Haar-ove transformacije. U cilju kvantitativne analize ovih odnosa uzmimo kao primjer transformaciju reda N , što znači da se procesom transformacije obuhvaća N točaka izvornog signala, što rezultira s N komponenti transformiranog signala. Tablica 1 prikazuje potreban broj operacija zbrajanja za više tipova transformacije kao i konkretne numeričke rezultate za $N = 1024$.

T A B L I C A 1

Tip transformacije	broj zbrajanja	broj zbrajanja za $n = 1024$
Walsh transformacija	$N(N - 1)$	1047552
Brza Walsh transformacija	$N \log_2 N$	10240
Haar-ova transformacija	$N \log_2 N$	10240
Brza Haar-ova transformacija	$2N - 2$	2046

7. Sklopovi za obradu signala Walsh i Haar-ovim funkcijama

Osnove sklopova, koje se rabe u ovoj tehnici, su linearni vremenski promjenljivi elementi, pa prema tome oni uključuju elektroničke sklopke, bistabile, memorijske elemente, sklopove za zbrajanje i invertiranje, razne logičke sklopove i sl. Kako se sklopovi izvedu u tehnici integriranih krugova, to nema

ograničenja za obradu širih razmjera. Osim toga ekonomičnost uređaja pokazuje do koje mjere ova tehnika obrade signala može biti zanimljiva u suvremenim radiokomunikacijama.

8. Bibliografija

1. Ahmed - Rao, "Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing", Springer-Verlag, Berlin 1975.
2. Barrett R. - Gordon J.A. "Walsh Functions - An Introduction" Theory and Applications of Walsh Functions Symposium, Hatfield 1971, England
3. Harmuth H.F. "Transmission of Information by Orthogonal Functions", Springer-Verlag, Berlin 1972.
4. Shore J.E. "On the Application of Haar Functions", IEEE Trans. Communications No. 3, 1973, 209-216

Mr Goran Stojkovski
Elektrotehnički fakultet, Zagreb
Zavod za visokofrekventnu tehniku

PRIMJENA POLUVODIČKIH LASERA KOD VELIKIH BRZINA PRIJENOSA INFORMACIJA

Analizirana su frekvencijska ograničenja poluvodičkog lasera. Opisani su načini modulacije za velike brzine prijenosa, tj. za područje od nekoliko stotina Mbit/s do nekoliko Gbit/s. Analizirani su neki postupci i izvedbe modulatora za te primjene i prikazani dobiveni rezultati.

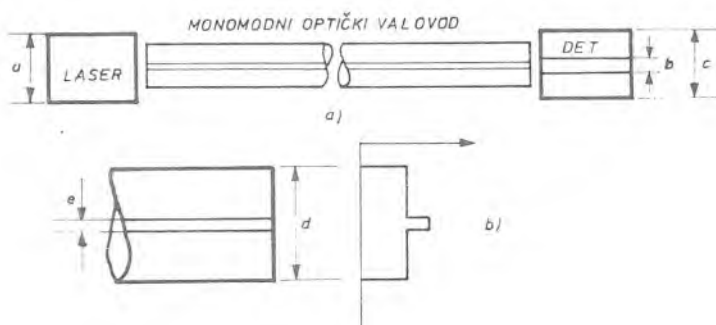
SEMICONDUCTOR LASERS IN HIGH RATE DATA TRANSMISSION

Semiconductor lasers are subject to some frequency limitations. High rate modulation techniques span a range from several hundred Mbit/s to several Gbit/s. Some modulation processes, modulator types and final results are analyzed.

1. Uvod

Kombinacija poluvodički laser - monomodni optički valovod predstavlja izvanredno rješenje za prijenos velikog broja podataka na manjim udaljenostima. Zbog toga je veoma pogodna za spregu velikih računala unutar aviona, brodova i drugih velikih informacijskih sustava. Pojednostavljena izvedba prikazana je na slici 1. na kojoj su dane i orijentacione dimenzije (1), ($a = 50-100 \mu\text{m}$, $b = 10-15 \mu\text{m}$, $c = 60-80 \mu\text{m}$, $d = 50-100 \mu\text{m}$, $e = 2-4 \mu\text{m}$). Kao što je sa slike vidljivo, dimenzije su veoma male, što je još jedna od prednosti ovakvog sustava.

Pored malih dimenzija poluvodički laser ima niz drugih prednosti: jednostavnu konstrukciju, jednostavno pumpanje istosmjernom strujom, veliko iskorištenje i mogućnost modulacije do veoma visokih frekvencija. Nedostaci su temperaturna ovisnost struje praga i problemi kod neprekinutog rada.



Slika 1. Pojednostavljena izvedba brze veze

U sustavima optičkih komunikacija pomoću optičkih valovoda najveća širina pojasa se dobije monomodnim prijenosom /2/. Monomodni optički valovod zahtijeva koherentne optičke izvore koji rade na jednom modu. Raspršenje monomodnih valovoda je reda 1 ns/km za 1% relativne širine pojasa /3/. Iz toga slijedi da spektralna širina izvora na valnim duljinama reda 900 nm treba biti manja od $4,5 \text{ \AA}$ kod slijeda od 2 Gbit/s i duljine valovoda do 10 km. Širina linije injeksionog lasera je manja od $1 \text{ \AA}$, dok je razmak linija nekoliko $\text{\AA}$. Iz ovoga slijedi da se višemosadni laseri ne mogu koristiti u gigabitnom području, gdje širina linije monomodnog lasera može biti zanemarena.

Modulaciona karakteristika injeksionog lasera odredjena je vremenom života elektrona τ_{sp} , vremenom života fotona τ_{ph} /4/, brojem titrajnih modova i odnosom spontanijh zračećih procesa u titrajnim modovima prema ukupnom broju spontanijh rekombinacija /5/. Kod DHS lasera τ_{sp} je reda 5 ns kod sobne temperature /6/, a τ_{ph} je nekoliko ps.

2. Modulacija bez prednapona i s prednaponom oko praga

Dovedemo li strujni skok amplitude I na injekcioni laser, vrijeme kašnjenja između prednjeg brida strujnog impulsa i nastanka koherentnog zračenja je dano sa /4,7/:

$$\tau_d = \tau_{sp} \ln [I/I - I_{th}] \quad (1)$$

gdje je I_{th} struja praga (sl. 2).

Nakon početnog kašnjenja svjetlost najprije brzo raste, nakon čega nastaju prigušeni titraji. Za primjenu PCM važno je malo kašnjenje τ_d i veliko gušenje relaksacionih titraja.

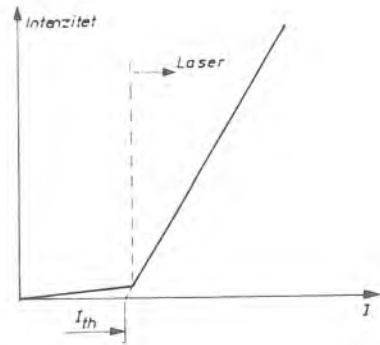
Prema (1) vrijeme kašnjenja $\tau_d = 1,1 \tau_{sp}$ se dobije za amplitudu impulsa $1,5 I_{th}$. Kako veća struja može jako pogoršati karakteristike lasera, τ_{sp} je praktički donja granica za vrijeme kašnjenja lasera bez

prednapona. Daljnje smanjenje vremena kašnjenja je moguće ako se laseru privede istosmjerna struja I_0 /8/. Uz dodatni strujni impuls amplitude I_p , vrijeme kašnjenja je određeno sa:

$$\tau_{dl} = \tau_{sp} \ln [I_p / (I_p - I_{th} + I_0)] \quad (2)$$

Na ovaj način je postignuta brzina od oko 200 Mbit/s /8/.

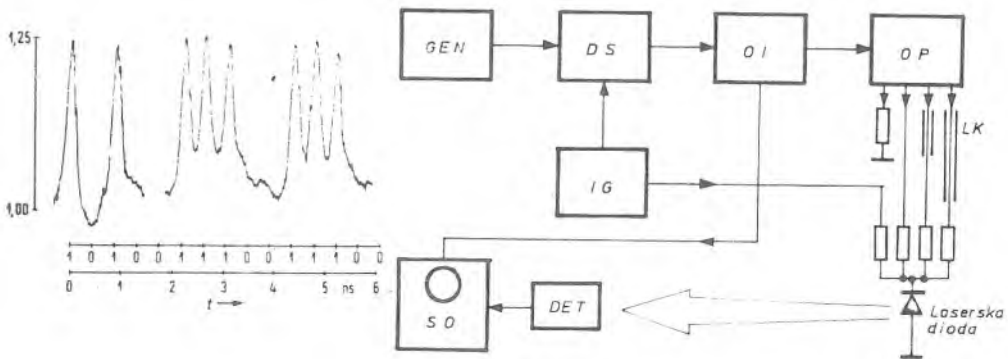
Nakon modulacionog impulsa gustoća elektrona opada eksponencijalno s vremenskom konstantom τ_{sp} na veličinu koja odgovara struji prednapona. Za slučaj kad dva impulsa slijede jedan za drugim, drugi impuls ima manje vrijeme kašnjenja pod uvjetom da razmak između impulsa nije bitno veći od τ_{sp} . Taj efekt, uzrokovan kašnjenjem koje ovisi o prethodnom impulsu, može se ukloniti kompenzacijom /9/. Dobiven je razmak između impulsa od 2 ns s laserom koji ima τ_{sp} 3,9 ns.



Slika 2. Karakteristika poluvodičkog lasera

3. Izravna modulacija s prednaponom iznad praga

Za modulaciju u gigabitnom području potreban je prednapon na ili iznad vrijednosti praga, kako bi se uklonilo kašnjenje svjetlosnog impulsa. Kada laser radi s prednaponom oko praga, relaksacioni titraji se mogu dobiti i pomoću modulacionih impulsa. Frekvencija i gušenje relaksacionih titraja ovise o parametrima lasera i struji prednapona /10, 11/. Eksperimentalno je dobivena /12/ modulacija na 1 Gbit/s s prednaponom na pragu. Za struju prednapona 7 - 20% iznad praga zamijećeni su prigušeni titraji na frekvencijama između 1 i 1,3 GHz. Tik iznad praga, gdje se dobije puno modova, nisu zamijećeni relaksacioni titraji. Slika 3. prikazuje izravnu modulaciju injeksionog lasera na 2,3 Gbit/s /13/, dok je na slici 4. prikazan mjerni sklop. Prednost korištenja rezonancije u modulacionom postupku



Slika 3. Modulacija signalima 10100 i 11100 na 2,3 Gbit/s

Slika 4. Sklop za mjerenje modulacije na 2.3 Gbit/s

opisana je u /8/. Laser s prednaponom iznad praga se modulira sinusnim signalom na vlastitoj rezonantnoj frekvenciji. Ovaj način zahtijeva malu modulacionu snagu, ali jako ovisi o vremenskim konstantama lasera i struji prednapona.

Gušenje postaje aperiodsko kad udio spontanijeh prijelaza koji daju prirast fotona u titrajnim modovima predje $5 \cdot 10^{-3}$. Taj stupanj pobude moguće je postići jedino u slučaju velikog broja titrajnih modova. Za mali broj modova postoji područje oko praga

gdje je gušenje aperiodsko. Kako je tik iznad praga broj modova veći, povećava se vjerojatnost velikog gušenja. Dobiveno je, kod modulacije 1Gbit/s, vrijeme porasta za red veličine manje od izračunate vrijednosti bez uzimanja u obzir gušenja uslijed spontanog procesa /14/.

4. Modulacija injektiranjem koherentne svjetlosti

Gušenje se takodjer može postići injektiranjem koherentne svjetlosti u jedan od titrajnih modova lasera /15/. Poznato je da je vezivanje frekvencija moguće provesti koherentnim ozračivanjem, što vodi do poboljšanja spektralne čistoće.

Za analizu dinamičkog ponašanja lasera polazimo od relacija:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau_{sp}} - g NS \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = R - \frac{S}{\tau_{ph}} + Vg NS \quad (4)$$

gdje je: N - gustoća elektrona, S - broj fotona, I - injekcijska struja, R - broj fotona injektiran u titrajni mod u jedinici vremena, V - zapremina aktivnog sloja, e - naboj elektrona, τ_{sp} - spontano vrijeme života elektrona, g - koeficijent stimulirane rekombinacije po bilinearnoj razdiobi i τ_{ph} - vrijeme života fotona.

Uz struju praga $I_{th} = e/g \tau_{sp} \tau_{ph}$ dobiju se slijedeći normalizirani parametri:

$$x = eS/I_{th} \tau_{ph} \quad (5)$$

$$z = Vg \tau_{ph} N \quad (6)$$

$$\eta = I/I_{th} \quad (7)$$

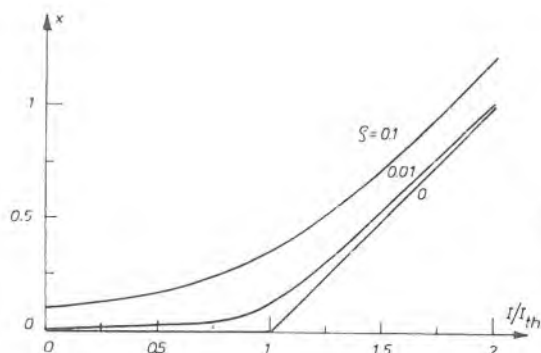
$$\zeta = eR/I_{th} \quad (8)$$

U stacionarnom slučaju broj fotona i gustoća elektrona u ovisnosti o struji i injekciji fotona dani su sa

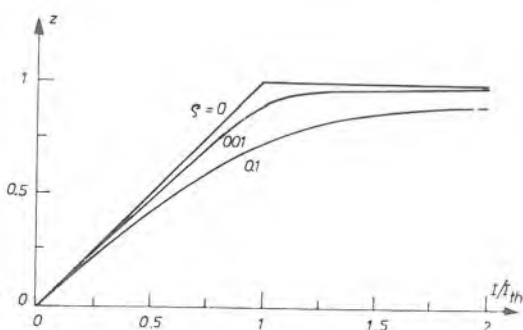
$$x = \frac{\zeta + \eta - 1}{2} + \left(\frac{\zeta + \eta - 1}{2} \right)^2 + \zeta \quad (9)$$

$$z = 1 - (\zeta/x) \quad (10)$$

Slika 5. prikazuje normalizirani broj fotona x u ovisnosti o normaliziranoj struji za $\zeta = 0, 0,01$ i $0,1$. Kao i kod jakog spontanog zračenja imamo povećanu gustoću elektrona ispod praga. Slika 6. prikazuje utjecaj koherentnog ozračivanja na gustoću elektrona. Kod koherentnog ozračivanja gustoća elektrona je ispod gustoće bez ozračivanja. Prema relaciji (10) faktor pojačanja, kod kojeg je vanjsko zračenje ζ pojačano na x , je $1/(1-\zeta)$. Bez vanjskog ozračivanja taj faktor postaje neizmjeran



Slika 5. Normalizirani broj fotona x



Slika 6. Normalizirana gustoća elektrona z

za rad iznad praga. Kod vanjskog ozračivanja potrebno je samo konačno pojačanje zbog pojačanja vanjskog zračenja do vrijednosti zasićenja koje je određeno injeksionom strujom. Ako se uzme u obzir spontano zračenje, faktor pojačanja je konačan i bez vanjskog ozračivanja. Kako se vanjsko ozračivanje na titrajnom modu može načiniti puno veće od spontanog zračenja u tom modu, faktor pojačanja je znatno manji, te ne dolazi do velikog pojačanja spontaninih modova na kojima nema vanjskog ozračivanja. Na taj način dolazi do potiskivanja svih neozračenih modova i do povećanja širine kanala kao posljedice smanjenja faktora pojačanja. Za analizu modulacije s malim signalima možemo početi sa:

$$x = x_0 + x_1 e^{j\omega t} + x_1^* e^{-j\omega t} \quad (11)$$

Uvrštenjem u jednađbe (3) do (8) dobiju se aproksimacije prvog reda za male signale:

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \zeta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + x_0 + j \omega \tau_{sp} & z_0 \\ -x_0 & 1 - z_0 + j \omega \tau_{ph} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ x_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

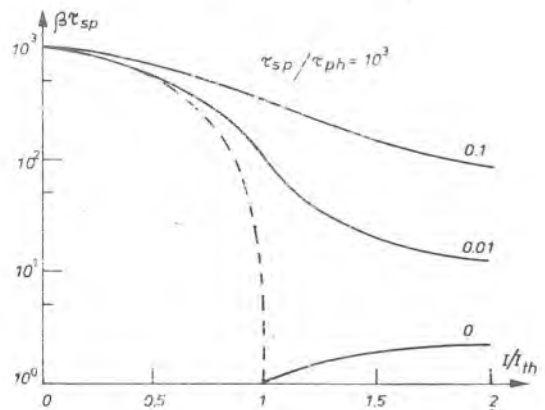
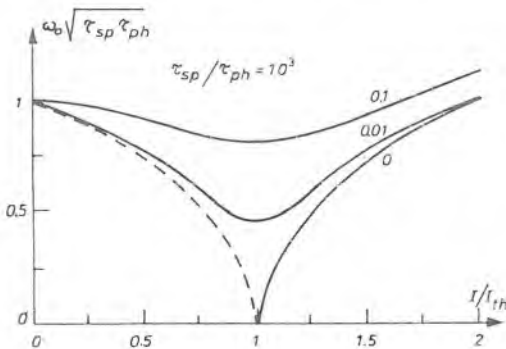
Ako je vanjsko zračenje nemodulirano ($\zeta = 0$), kompleksna amplituda normalizirane gustoće fotona x_1 ovisi o kompleksnoj amplitudi η_1 izmjenične struje superponirane na istosmjerni prednapon.

$$x_1 = \frac{x_0 \eta_1}{\omega^2 + j\omega\beta - \omega^2} \quad (13)$$

$$\text{sa } \beta \tau_{sp} = 1 + x_0 + \frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}} (1 - z_0) \quad (14)$$

$$\text{i } \omega_0^2 \tau_{ph} \tau_{sp} = 1 + x_0 - z_0 \quad (15)$$

Konstanta gušenja i kutna rezonantna frekvencija ω_0 strogo ovise o vanjskom ozračivanju. Normalizirana konstanta gušenja $\beta \tau_{sp}$ i normalizirana kutna frekvencija $\omega_0 \sqrt{\tau_{sp} \tau_{ph}}$ prikazane su na slikama 7. i 8. za odnos $\tau_{sp}/\tau_{ph} = 1000$, koji odgovara realnim vrijednostima $\tau_{sp} = 2 \text{ ns}$, $\tau_{ph} = 2 \text{ ps}$. Za slučaj bez vanjskog ozračivanja ω_0 je mnogo viša od $\beta/2$. Aperiodično gušenje uz $\beta > 2\omega_0$ može se postići za $\zeta \neq 1$. Na primjer uz $\tau_{sp} = 2 \text{ ns}$, $\tau_{ph} = 2 \text{ ps}$ i $\eta_0 = 1,2$ za $\zeta = 0$ dobije se $\beta = 0,6 \cdot 10^{-9}/\text{s}$, $\omega_0 = 7,07 \cdot 10^{-9}/\text{s}$, a $2\omega_0/\beta = 23,56$; za $\zeta = 0,01$ dobije se $\beta = 20,6 \cdot 10^{-9}/\text{s}$, $\omega_0 = 8,52 \cdot 10^{-9}$ u sek. i $2\omega_0/\beta = 0,827$.



Slika 7. Normalizirana konstanta gušenja slika 8. Normalizirana kutna rezonantna frekvencija

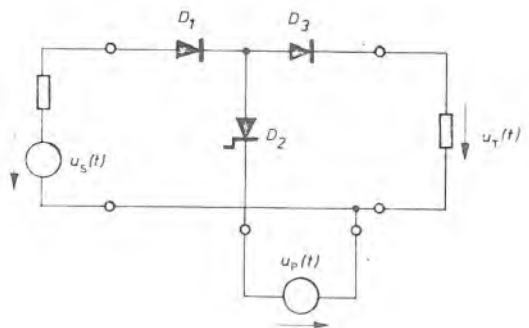
5. Modulator sa step-recovery diodama

Korištenje nakrcavanja naboja kod dioda s brzim oporavkom omogućava izvedbu pojačala impulsa u subnanosekundnom području. Pobudi li se slojna dioda u vodljivom smjeru, nakrcavaju se injektirani minoritetni nosioci u difuzionom području. Obrne li se napon, trenutno poteče jaka struja u zapornom smjeru tako dugo dok se nakrcani naboj ne isprazni preko zapornog sloja ili rekombinacijom. Ako je vrijeme od uključenja struje u vodljivom smjeru do kraja struje u zapornom smjeru malo u odnosu na vrijeme uskladištenja, onda je udio izgubljenog naboja uslijed rekombinacije malen u odnosu na naboj izvučen iz diode u zapornom smjeru. Za nabijanje diode u vodljivom smjeru potreban je mali napon. Prazni li se dioda preko velikog radnog otpora, nastaje na otporu tijekom pražnjenja visoki napon, tj. dobije se naponsko pojačanje impulsa.

Za provedbu ovog principa pojačanja potrebno je da dioda ima što je moguće veće vrijeme nakrcavanja, te da se što je moguće brže vraća u zatvoreno stanje. Kod tipičnih dioda je vrijeme nakrcavanja između 10 i 100 ns, a vrijeme prekapčanja između 50 i 100 ps.

Slika 9. prikazuje principijelni spoj takvog pojačavačkog stupnja, dok slika 10. omogućava objašnjenje principa rada.

Na ulazu je izvor signala s naponom praznog hoda $u_s(t)$ unutarnjeg otpora R_s . D_2 je step-recovery dioda. D_1 i D_2 su brze preklopne diode (npr. Schottky diode s vremenom preklapanja ispod 100 ps). SR dioda D_2 se nabija za vrijeme pozitivnog impulsa u_s preko D_1 . Za to vrijeme je u_p lagano negativan, tako da struja nabijanja teče kroz D_2 a ne kroz D_3 . Nadalje, negativnim prednaponom u_p se postiže da su D_1 i D_2 vodljivo polarizirane. Naboj $q(t)$ opada nakon kraja impulsa punjenja. Osnova je rekomb-



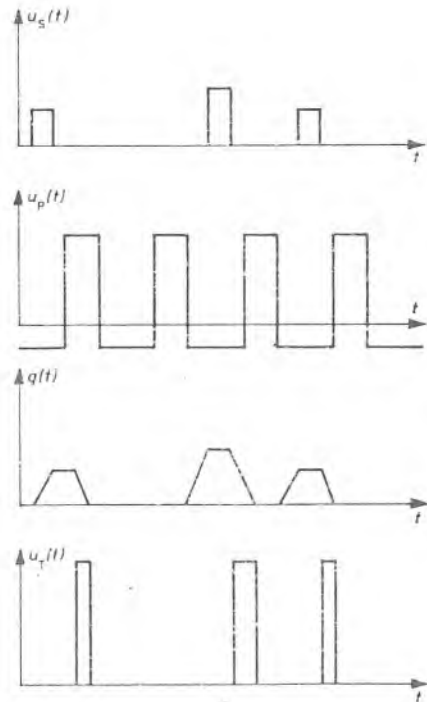
Slika 9. Princip diodnog pojačala

binacija u D_2 i kratka povratna struja kroz D_1 do isključenja D_1 . Ako je $u_p(t)$ pozitivan, D_3 je otvorena, a kroz D_2 teče u zapornom smjeru struja tako dugo dok se naboj $q(t)$ ne isprazni. Budući su naponi na diodama D_2 i D_3 protusmjerni, $u_T(t)$ je približno jednak $u_p(t)$. Napon $u_p(t)$ je "pumpni" napon, jer pum-pa naboj s D_2 na viši potencijal. Naponsko pojačanje je u prvom redu određeno veličinom $u_p(t)$. R_T određuje jakost struje pražnjenja te time, budući je naboj određen, širinu izlaznog impulsa. Površina izlaznog impulsa je proporcionalna površini ulaznog impulsa, pri čemu se u prvom redu mijenja širina izlaznog impulsa. Za promjenu izlaznog impulsa nema nikakve važnosti da li se povećava širina ili visina ulaznog impulsa. Tek kad ulazni signal postane tako malen da je širina izlaznog signala zbroj vremena porasta i vremena pada, opada izlazni signal s daljnjim smanjenjem ulaznog signala.

R_T je prema gore ograničen time da najveća širina izlaznog impulsa mora biti manja od širine pozitivnog impulsa pumpanja, te time da daljnjim proširenjem širine izlaznih impulsa rastu gubici rekombinacije naboja. Uzme li se R_T premalen, postaju padovi napona na D_2 i D_3 i unutarjem otporu izvora pumpanja preveliki i naponsko pojačanje opada.

Kako se sa slike 10. može vidjeti, položaj ulaznog signala nema utjecaja na izlazni signal tako dugo dok ulazni signal leži između odgovarajućih impulsa pumpanja.

Za razliku od naponskog pojačanja, pojačanje naboja je uvijek manje od 1. Ono se može izračunati za jednostavan slu-



Slika 10. Oblici signala u pojačalu

čaj prikazan na slici 11. SR dioda se puni za vrijeme T_1 konstantnom strujom I_1 . Za vrijeme T_2 ne teče nikakva struja. Nakon toga teče konstantna struja pražnjenja $-I_2$ tako dugo dok se dioda potpuno ne isprazni.

Naboj SR diode pokorava se zakonu

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{\tau_s} = i(t) \quad (16)$$

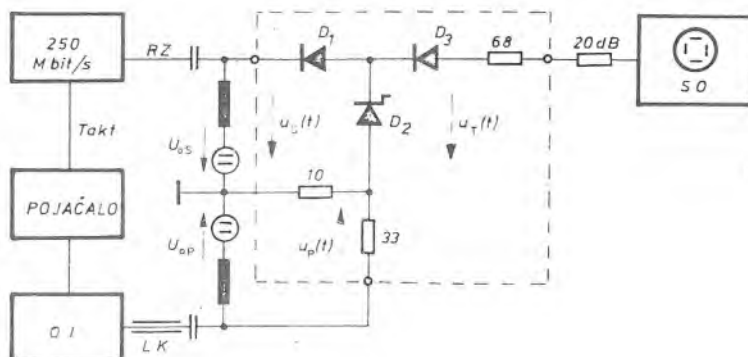
gdje je τ_s vremena nakrcavanja diode. Pojačanje naboja je /16/

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1} \frac{\tau_s}{T_1} \ln \left\{ 1 + \frac{I_1}{I_2} [1 - \exp(-T_1/\tau_s)] \exp(-T_2/\tau_s) \right\} \quad (17)$$

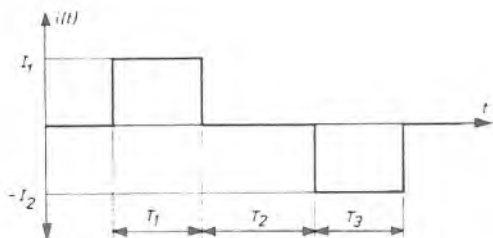
za $T_1, T_2, T_3 \ll \tau_s$ vrijedi približna relacija

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_1}{I_2} \right) \frac{T_1}{\tau_s} - \frac{T_2}{\tau_s} \quad (18)$$

Da bi se dobilo pojačanje naboja što je moguće bliže jedinici, trebaju intervali T_1 i T_2 biti mali u odnosu na τ_s i struja I_2 treba biti ne manja od I_1 .

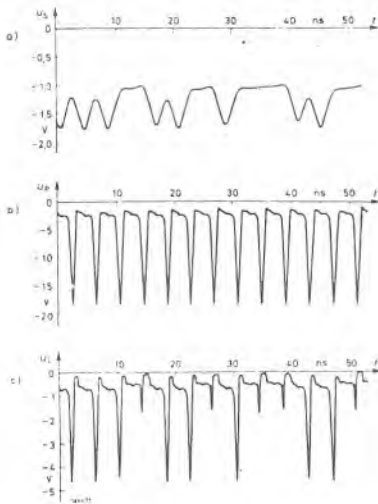


Slika 12. Mjerni sklop za diodno pojačalo

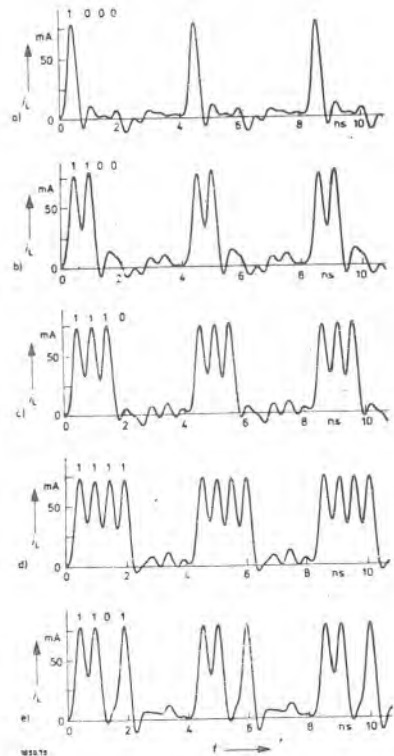


Slika 11. Nakrcavanje i pražnjenje step-recovery diode

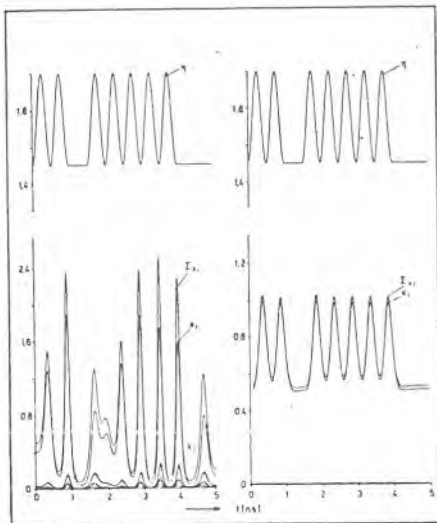
Mjerni sklop je prikazan na slici 12., dok slika 13. pokazuje dobivene rezultate. Slika 14. prikazuje dobivene rezultate na jednom četverokanalnom multiplekseru /16/. Slika 15. prikazu-



Slika 13. Rezultati mjerenja na sklopu sa slike 12.



Slika 14. Signali 2 Gbit/s
a-1000 b-1100 c-1110
d-1111 e-1101



Slika 15. Modulacija kod 2Gbit/s
a-bez injektiranja
b-sa injektiranjem

Slika 15. prikazuje brojčanu simulaciju PCM kod 2 Gbit/s sa i bez injekcije koherentne svjetlosti /17/. Proračuni su provedeni za laser s vremenom života fotona 1 ps, vremenom života elektrona 5 ns i prednaponom od $1,5 I_{th}$ i odnosom spontanog zračenja u jednom titrajnom modu prema ukupnoj spontanoj rekombinaciji $2 \cdot 10^{-4}$. Pobudno zračenje je samo 1% od razine koju laser daje na dvostrukoju struji praga.

Popis korištene literature:

1. Fortschritte in der Glasfasser-Nachrichtenübertragung, NTZ, Januar 1975, K19
2. Boerner, M: "Ein optisches Nachrichtenübertragungssystem für in Pulscodemodulation dargestellte Nachrichten", DBP, Nr 1 253 513
3. Gloge, D: "Dispersion in weakly guiding fibers" Appl. Opt. 10 1971, 2442
4. Adams, M.J.: "Rate equations and transient phenomena in semiconductor lasers" Optoelectronics I, 1973, 201
5. Roess, D.: "Einfluss der spontanen Emission auf das Einschwingverhalten von Lasern" Z. Naturforschung, 199, 1964, 1169
6. Dymont, J.C. & alt: "Measurement and interpretation of long spontaneous lifetimes in double heterostructure lasers" J.App.Phys. 43, 1972, 452
7. Konnerth, K. Lanza, C.: "Delay between current pulse and light emission of a gallium arsenide injection laser" App.Phys.Lett. 11, 1967, 346
8. Ozeki, T. Ito, T.: "Pulse modulations of DH-(GaAl)As lasers" IEEE J.Quant. Electr. Q-E9, 1973, 388
9. Ozeki, T. Ito, T.: "A new method for reducing pattern of effect in PCM current modulation of DH-(GaAl)As lasers" IEEE J.Quant.Electr.Q-E9, 1973, 1098
10. Paoli, T.L. Ripper, J.E.: "Direct modulation of semiconductor lasers" PIEEE, 58, 1970, 1457
11. Ikegami, T. Suematsu, Y.: "Resonant-Like characteristics of the direct modulation of junction lasers" PIEEE, 55, 1967, 122
12. Chown, M. & alt: "Direct modulation of double-heterostructure lasers at rates up to 1 Gbit/s" Electr. Lett. 9, 1973, 34
13. Russer, P. Schulz, S.: "Direkte Modulation eines Doppel-heterostrukturlasers mit einer Bitrate von 2,3 Gbit/s" Arch. Elektron. u. Übertragungs techn. 27, 1973, 193
14. Yanai, H. & alt: "Direct modulation of a double-heterostructure laser using a schotky - barrier - gate Gunn-effect digital device" IEEE J. Quant. Electron. QE 11, 1967, 122
15. Russer, P.: "Modulation behaviour of injection lasers with coherent irradiation into their oscillating mode" Arch.Elektron. u. Übertragungstechn. 29, 1975, 231
16. Russer, P.: "Hybrid integrierter Multiplexer mit Speicherschaltioden für Gbit/s Bereich", AEG Telefunken 48, 1975, 55
17. Hillbrand, H. Russe, P.: "Large-signal PCM ..." Electron.Lett. 11, 1975, 372

Ervin Zentner
Elektrotehnički fakultet,
Zavod za visokofrekventnu
tehniku, Zagreb

MOGUĆNOSTI DJELOTVORNIJEG ISKORIŠTENJA RADIOFREKVENCIJSKOG SPEKTRA U MOBILNIM RADIOKOMUNIKACIJAMA

Izložen je problem smetnji u mobilnim mrežama i s time u vezi vrste modulacije, način planiranja mreže i raspodjele radiokanala sa svrhom da se poveća ukupni koeficijent iskorištenja sustava. Pri određivanju stalnog rasporeda kanala prikazana je mogućnost upotrebe elektroničkog računala za rješavanje problema predskazivanja jakosti polja i uklanjanja istokanalnih smetnji. Zbog što boljeg iskorištenja radiofrekvencijskog spektra, pokazana je mogućnost primjene promjenljivog rasporeda kanala, kod kojeg je ukupni koeficijent iskorištenja veći u odnosu prema stalnom rasporedu kanala.

SOPHISTICATED RADIO FREQUENCY SPECTRUM UTILIZATION FOR MOBILE RADIO COMMUNICATIONS

Interference problems in mobile radio communications systems are related to several considerations, e.g., modulation methods, methods of radio zone planning and frequency allocations, aimed at increasing the overall efficiency of the system. In fixed channel assignment computers can be used in predicting field strength and eliminating co-channel interference. The dynamic channel assignment concept and its greater traffic-carrying capacity improve frequency spectrum utilization.

1. Uvod

Iako je težište stvaralačkog rada N.Tesle bilo na području generiranja i primjene izmjeničnih električnih struja za potrebe energetike, ne smije se, kada se spominju radiokomunikacije, prešutjeti i njegovo ime. Njegovih dvanaest patenata iz područja radiokomunikacija (lit.1) te neki od ostalih radova uvrštavaju ga među pionire tog područja elektrotehnike. On je već u godinama na prelomu stoljeća shvatio potrebu frekven-

cijske selektivnosti u razdvajanju signala za prijenos poruka. S obzirom na ondašnje mogućnosti koristio je impulsnu modulaciju, a budući da je mogao proizvesti prigušene oscilacije pokušao je hlađenjem smanjiti prigušenje. Da bi povećao tajnost poruka i istovremeno smanjio smetnje, prikazao je mogućnost istovremenog odašiljanja više frekvencija; nešto slično što se danas koristi pri selektivnom pozivu. Njegovi radovi na visokofrekventnim oscilacijama proširuju se i na druga područja primjene.

U ovom radu bit će izneseni problemi iskorištenja radiofrekvencijskog spektra u specifičnim mobilnim radiokomunikacijskim sustavima. Sustavi za neprekidno održavanje veze s objektima u gibanju mogu se grubo podijeliti na kopnene, pomorske, zračne, i u novije vrijeme, kozmičke radiokomunikacije. S obzirom da su potrebe za mobilnim komunikacijama na kopnu iz dana u dan sve veće i u nekim zemljama godišnji porast iznosi čak 30%, pojavljuje se gorući problem kako što bolje iskoristiti postojeći spektar. Počela su i razmatranja da se otvore novi frekvencijski opsezi, budući da su postojeći prezasićeni. Analize i procjene, koje će ovdje biti iznesene, dovoljno su općenite da se uz određene specifičnosti u rasprostiranju mogu primjeniti i na te nove opsege.

2. VELIČINE KOJE UTJEČU NA ISKORIŠTENJE RADIOFREKVENCIJSKOG SPEKTRA

2.1. Koeficijent iskorištenja

Iskorištenje raspoloživog radiofrekvencijskog spektra ne ovisi samo o njegovoj podjeli na radiokanale u frekvencijskoj domeni, nego i o mogućnosti korištenja tih kanala na određenoj geografskoj teritoriji i za određeno vrijeme. Prema tome ukupni koeficijent iskorištenja se može definirati kao:

$$\eta = \eta_s \cdot \eta_p \cdot \eta_v \quad (1)$$

gdje indeksi s, p i v označavaju parcijalne koeficijente iskorištenja koji se odnose na spektar, prostor i vrijeme. Parcijalni koeficijenti iskorištenja dani su izrazima:

$$\eta_s = \frac{B_i}{B} ; \quad \eta_p = \left(\frac{D_i}{D} \right)^2 ; \quad \eta_v = \frac{T}{T_i} \quad (2)$$

gdje B_i , D_i i T_i predstavljaju efektivnu širinu kanala, srednju geografsku udaljenost istokanalnih centralnih odašiljača i srednje vrijeme zaposjedanja jednog kanala za pretpostavljeni gubitak prometa (misli se na prijenos govora, podataka i sl.) u idealnom sustavu. Analogno veličine B , D i T odgovaraju realnom sustavu. Na žalost, odvojeno razmatranje parcijalnih koeficijenata iskorištenja nije moguće, jer oni indirektno utječu jedan na drugoga. Npr. ako se želi smanjiti efektivna širina kanala, potrebno je promijeniti ili vrstu ili indeks modulacije, što povlači za sobom promjenu minimalno dozvoljenog odnosa signal/smetnja, koji onda diktira i drugačiju srednju udaljenost istokanalnih odašiljača. Prema tome poboljšanje spektralnog koeficijenta iskorištenja može pratiti smanjenje prostornog iskorištenja, tako da se ukupni koeficijent iskorištenja ne mijenja ili se čak može pogoršati.

Kao drugi primjer može se razmotriti želja za povećanjem vremenskog faktora iskorištenja. Poznata je činjenica da će se vrijeme zaposjedanja kanala, uz pretpostavljeni gubitak prometa moći povećati ako se načine veće grupe kanala dostupne svakom od mobilnih primopredajnika. Kako je ukupan broj kanala ograničen, znači treba mijenjati srednju geografsku udaljenost istokanalnih odašiljača, što ovisno o uvjetima propagacije može smanjiti ili eventualno i povećati prostorni koeficijent iskorištenja, jasno na račun složenosti sustava. Idealni sustav s koeficijentom iskorištenja jedan teško je zamisliti, međutim pri uspoređivanju različitih realnih sustava to nije ni bitno, tako da se idealni sustav može proizvoljno odabrati.

2.2. Modulacioni postupci

Kod izbora najpovoljnijeg modulacionog postupka prvenstveno treba imati na umu iskorištenje raspoloživog spektra, zatim ekonomske i pogonske uvjete s obzirom da se radi o relativno velikom broju mobilnih primopredajnika. Nekadašnji raz-

mak kanala od 50 kHz smanjen je danas na 25 kHz s time da se i dalje koristi frekvencijska modulacija (FM). Postoje zamisli, pokušaji pa i realizirani sustavi s razmakom kanala od 12,5 kHz. U tom slučaju je moguće koristiti i dalje frekvencijsku modulaciju sa smanjenom devijacijom ili amplitudnu modulaciju (AM), posebno onu s jednobočnim prijenosom.

Budući da kod prostorne raspodjele jakosti polja zbog višestrukog širenja nastaju duboki minimumi, analogno kao kod stojnog vala, onda zbog gibanja vozila nastaje brzi Rayleigh-ev fading, pa je amplitudna modulacija gotovo neupotrebljiva. Bez posebnih mjera poboljšanja signal izobličenja zbog fadinga je veći od korisnog signala na izlazu iz prijemnika. Taj se odnos ne mijenja ma koliko se povećala snaga odašiljača. Jedini način da se potisne signal izobličenja zbog fadinga jest upotreba brze automatske regulacije pojačanja i eventualno korekcije faze. Međutim, i uz takve mjere poboljšanja, kvaliteta FM sustava je znatno bolja.

Ako se pogledaju istokanalne smetnje, onda minimalan odnos korisnog prema smetajućem signalu u AM sustavu mora biti oko 10 dB veći nego u FM sustavu (lit.2), što znači da je srednja feografska udaljenost istokanalnih odašiljača približno dva puta veća. U tom slučaju je prostorni koeficijent iskorištenja četiri puta manji, tako da FM sustavi s razmakom kanala od 12,5 kHz imaju jednaki ukupni koeficijent iskorištenja kao jednobočni AM sustavi s razmakom 3 kHz. Iz naprijed spomenutih poteškoća kod AM vidi se da nema smisla ići na tu vrstu modulacije i uske kanale. Donja upotrebljiva granica bi prema tome danas bila širina kanala od 12,5 kHz s time da se koristi FM.

Budući da se u FM sustavu mora proporcionalno širini kanala smanjiti i devijacija, može se u svrhu poboljšanja kvalitete prijenosa, odnosno povećanja dometa koristiti komandore. Poboljšanja u odnosu signal/šum su reda veličine 10 dB, a osim toga zbog karakteristike slogovnog komandora, postiže se i dodatno poboljšanje u potiskivanju kratkih impulsnih smetnji.

2.3. Interferencije

Smetnje unutar samog sustava mogu se podijeliti na istokanalne i smetnje unutar grupe kanala, a moguće ih je

uzeti u obzir pri planiranju sustava. Vanjske smetnje su izazvane parazitnim zračenjima ostalih radiokomunikacijskih sustava ili zračenjima najrazličitijih električkih naprava tako da ih se ne može umaprijed uzeti u obzir, već ih treba analizirati od slučaja do slučaja. Uz relativno velik odnos signal/smetnja, istokanalna interferencija uzrokovana samo jednim nosiocem, očituje se kao pogoršanje odnosa signal/šum nakon demodulacije i moguće djelomično razumljivo preslušavanje. Smanjenjem odnosa signal/smetnja nastaje u određenom trenutku prigušenje korisne modulacije, da bi, kad taj odnos postaje manji od jedan, u demoduliranom signalu prevladala modulacija smetajućeg kanala. Ako postoji veći broj istokanalnih smetnji, nema razumljivog preslušavanja već se samo prigušuje korisna modulacija s porastom ukupne snage smetnji. Na sreću je kod frekvencijske modulacije potreban minimalni odnos signal/smetnja, svega oko 8 dB, što jasno olakšava geografsko planiranje.

Smetnje unutar grupe kanala nastaju kada se dva ili više neželjena signala pojave istovremeno na ulazu prijemnika. Zbog nelinearnih karakteristika sklopova na početku prijemnog lanca, koji moraju propuštati cijelu grupu kanala, nastaje intermodulacija. Produkti intermodulacije, stvoreni neparnim potencijama nelinearne karakteristike, daju komponente u spektru koje padaju unutar primljene grupe kanala. Ako se jedna od komponenta poklapa s frekvencijom kanala, na kojem se vrši prijem, efekti su jednaki onima kod istokanalnih smetnji. Produkti intermodulacije trećeg reda su najveći, a njihov položaj u spektru, ovisno o tome da li postoje dva (f_1, f_2) ili tri (f_1, f_2, f_3) smetajuća signala, dan je relacijom:

$$\begin{array}{ll} f_0 = 2f_1 - f_2 & f_0 = f_1 + f_2 - f_3 \\ f_0' = f_1 - f_2 + f_3 & \\ f_0'' = -f_1 + f_2 + f_3 & \end{array} \quad (3)$$

Produkti intermodulacije višeg reda (5., 7., ...) redovito se mogu zanemariti. Najdjelotvorniji način borbe protiv smetnji zbog intermodulacije jest taj, da se unutar grupe kanala za jedno geografsko područje izaberu samo oni kanali kod kojih se svi mogući produkti intermodulacije trećeg reda ne poklapaju niti s jednim od izabranih kanala. To je moguće izvesti (lit. 10), ako se razlika u frekvencijama između bilo koja dva kanala

unutar izabrane grupe pojavljuje samo jednom. Ako se kanali poredaju prema rastućim frekvencijama i označe brojevima od 1 do N , onda se taj uvjet može pisati kao:

$$m_p - m_2 \neq m_r - m_s \quad (4)$$

gdje $m_{p,q,r,s}$ označava bilo koji redni broj kanala unutar grupe. Od ukupno N kanala moguće je izabrati ograničen broj onih koji su slobodni od intermodulacija trećeg reda. Za N između 6 i 9 maksimalan broj takvih kanala iznosi 3, za 10-14 je 4, za 15-20 je 5, za 21-28 je 6, za 29-39 je 7 itd. Ako bi se smetnje zbog produkata intermodulacije trećeg reda unutar jedne zone i između susjednih zona izbjegle korištenjem kompatibilnih kanala, od ukupnog broja kanala, koji stoje na raspolaganju, relativno veliki dio bi ostao neiskorišten. Prema tome moraju se dozvoliti intermodulacione smetnje s time da se u odabranoj mreži svedu na najmanju moguću mjeru bilo planiranjem kanala bilo propisanim karakteristikama uređaja.

Najpovoljniji postupak u tom smislu jest korištenje grupa samo parnih i neparnih kanala, jer u tom slučaju produkti intermodulacije padaju unutar iste grupe kanala (lit. 3). Na taj način se izbjegnu smetnje između susjednih zona zbog intermodulacije u centralnom odašiljaču, centralnom prijemniku i mobilnom prijemniku, što je povoljno jer nema korelacije između snage korisnog i smetajućeg signala. Naprotiv, unutar jedne zone između snage smetnje uzrokovane centralnim odašiljačem ili mobilnim prijemnikom i korisnog signala postoji velika korelacija, pa su te smetnje znatno manje od takvih smetnja između susjednih zona. Intermodulaciju u centralnom prijemniku moguće je smanjiti upotrebom oštarih jednokanalnih filtera i povećanom linearnošću ulaznih sklopova prijemnika, s time da postoji još i mogućnost smanjenja snage mobilnih odašiljača, kada oni dođu blizu centralnog prijemnika.

2.4. Konfiguracija mreže i raspored kanala

Kod geografskog planiranja lokacija centralnih primopredajnika polazi se od beskonačne pravilne konfiguracije mreže koja se dobiva presjecanjem dviju porodica paralelnih ekvidistantnih pravaca. Tri susjedne lokacije čine općenito raznostra-

ničan trokut sa stranicama d_1, d_2 i d_3 . Ako se želi postići da geografsko područje bude što ravnomjernije pokriveno i da preklapanje zona bude što manje, stranice elementarnog trokuta mreže moraju biti jednake. Analogno tri susjedna istokanalna primopredajnika čine trokut koji za optimalno geografsko iskorištenje mora biti istostraničan. Dakle, optimum se postiže kada su i elementarni i istokanalni trokuti istostranični. U tom slučaju se zone mogu predstaviti kao pravilni šesterokuti. Ako se odabere takva geometrija mreže, onda potreban broj kanala N_0 slijedi iz polumjera zone R_0 i razmaka istokanalnih odašiljača D_0 kao:

$$N_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{D_0}{R_0} \right)^2 \quad (5)$$

Očito da za određene parove vrijednosti D_0, R_0 treba broj potrebnih kanala iz jedn.(5) zaokružiti na prvi viši cijeli broj. Osim toga, zbog zahtjeva da su istokanalni trokuti istostranični, ne mogu se za ukupan broj kanala rabiti svi cijeli brojevi, nego samo oni (lit.11) koji zadovoljavaju uvjet:

$$N_0 = a^2 + b^2 + a \cdot b \quad \text{uz} \quad a, b = \text{poz. cj. brojevi} \quad (6)$$

dakle $N_0 = 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, \dots$

Budući da broj potrebnih istovremenih veza unutar jedne zone ovisi o broju mobilnih primopredajnika, treba svakoj zoni dodijeliti M_0 kanala. Uz pretpostavku jednolike raspodjele mobilnih stanica po zonama, ukupan broj kanala potreban za cijelu mrežu je $N = N_0 \cdot M_0$.

Ovako idealiziranu mrežu, kakva je isnesena do sada, treba prilagoditi stvarnim uvjetima koji ovise o dvije bitne činjenice:

- 1) nemoguće je u svim slučajevima centralne primopredajnike postaviti na lokacije koje odgovaraju idealiziranoj konfiguraciji mreže,
- 2) gustoća mobilnih primopredajnika u pojedinim zonama se mijenja i vremenom i prostorom, a najveća je u gradskim područjima.

Da bi se približili idealiziranoj mreži uz korištenje stvarnih lokacija, moguće je podesiti pojedine dijagrame zračenja antenskih sustava centralnih stanica tako da granice pojedinih zona ostaju zadržane. Na taj način se centri zona praktički nisu po-

maknuli. Međutim, gustoća mobilnih stanica, o kojima ovisi promet, ne može se mijenjati, pa treba polumjer zone i/ili broj kanala po zoni prilagoditi potrebama. Optimalno iskorištenje spektra, u uvjetima kada se gustoća prometa ne mijenja s vremenom a različita je za pojedina geografska područja, postiže se prilagodbom polumjera zone. U tom slučaju je polumjer zone obrnuto proporcionalan gustoći prometa, a broj mobilnih stanica u svim zonama je sada isti. Prema tome moguće je koristiti jednako velike grupe kanala u svim zonama, jer je promet svuda jednak. To zahtijeva promjenljivu geometriju mreže a time i gustoću centralnih stanica.

Ako se u svim geografskim područjima želi uspostaviti ista geometrija mreže, onda je potrebno da grupe kanala koje se dodjeljuju pojedinim zonama, budu različito ovisne o prometu. Iskorištenje spektra je u takvoj mreži lošije. Budući da se gustoća prometa u stvarnim mrežama mijenja i s vremenom, potrebno je polumjer zone prilagoditi srednjoj gustoći prometa u dotičnom geografskom području, a vremensko kolebanje ujednačiti dodjeljivanjem promjenljivog broja kanala po zoni. Jasno da u tom slučaju mreža postaje veoma složena a upravljanje se može provesti jedino iz jednog centralnog mjesta.

3. POKRIVENOST ZONE I ISTOKANALNE SMETNJE

Poznavanje pokrivenosti zone s određene lokacije centralne stanice je faktor koji bitno utječe na donošenje odluke o mjestu konačnog postavljanja centralnog primopredajnika. Vrlo često se pokrivenost zone provjerava privremenim postavljanjem centralnog primopredajnika na povoljne lokacije i mjerenjem signala unutar zone po unaprijed utvrđenom rasporedu. Za područja s vrlo nepovoljnom geografskom konfiguracijom se na taj način dobivaju vrlo vrijedni podaci, međutim za ostala područja takav način provjere pokrivenosti je neekonomičan, jer zahtijeva dosta vremena, opreme i ljudi. Zbog toga se teorijskim proračunima treba dati veće značenje.

U CCIR-preporukama dane su krivulje rasprostiranja za različita frekvencijska područja u zavisnosti od geografskih parametara (ekvivalentna visina antene, valovitost terena, rasi-

panje po lokacijama). Na temelju tih krivulja i radijalnih profila za odabranu lokaciju centra zone moguće je dobiti statističke podatke o pokrivenosti. Kod pomaka lokacije centra zone treba ponovo odrediti radijalne profile da bi se mogao provesti proračun. Broj radijalnih profila redovito ne prelazi 24 (svakih 15°), pa su dobiveni podaci dosta grubi.

Mnogo bolji podaci mogu se dobiti korištenjem modernih računala s velikom memorijom i brzinom računanja, tako da je moguće odrediti konture jednake jakosti polja sa željenom finošću. U postupku se ne koriste CCIR-krivulje već se jakost polja računa na temelju gušenja u slobodnom prostoru i dodatnog gušenja uslijed zapreka, bilo da nije potpuno slobodna prva Fresnelova zona ili se lokacija mobilnog primipredajnika nalazi dublje u sjeni iza jedne ili više zapreka.

Da bi se proračun mogao provesti, potreban je profil između lokacije centralne i mobilne stanice. Točnost rekonstrukcije profila zavisi od broja uzoraka terena. Jedna ravnoteža između količine uskladištenih podataka i željene točnosti profila postiže se podjelom promatranog geografskog područja na kvadrate sa stranicom od 0,5 km (lit.9). Za svaki kvadrat se iz preciznih geografskih karata odredi nadmorska visina terena. Na temelju tih uskladištenih podataka određenim algoritmom rekonstruira se profil između centra zone i pojedinih lokacija unutar zone, da bi se zatim pristupilo izračunavanju ukupnog gušenja. Poznavajući karakteristiku zračenja centralnog primopredajnika dobiva se jakost polja u bilo kojoj točki zone. Za područje dimenzija 60x60 km proračun polja za sve kvadrate stranice 0,5 km iznosi cca 20 min. (lit.8), a uspoređivanja s eksperimentalno dobivenim rezultatima u području 86 MHz pokazala su grešku sa standardnom devijacijom od 7,2 dB što zadovoljava.

Budući da u istom frekvencijskom opsegu često radi veći broj nezavisnih mobilnih mreža manjeg kapaciteta koje pripadaju različitim korisnicima, postaje problem raspodjele kanala u takvim složenim situacijama akutan. Upotreba elektroničkog računala u svrhu optimalnog iskorištenja spektra je u tom slučaju vrlo djelotvorna. Postupak se sastoji iz dva dijela. Prvo se na temelju profila, frekvencije i izračune snage odredi nivo

istokanalnih smetnji na rubovima svih zona uz pretpostavku da svi centralni primopredajnici rade na istom kanalu. Uspoređivanjem tih smetnji s maksimalno dozvoljenima, koje ovise o korisnom signalu, dobiva se podatak koje se sve zone međusobno smetaju. To se može napisati u obliku matrice gdje redni broj zone odgovara rednom broju retka, odnosno stupca. Ako je istokanalna smetnja manja od dozvoljene, onda se u matricu upisuje brojka 1, a ako je veća upisuje se nula. Dobivena matrica se dalje obrađuje da bi se dodio minimalni broj kanala.

U lit.8 prikazane su neke od metoda za određivanje minimalnog broja kanala preko takvih matrica smetnji. Princip leži u tome da se iz matrice trebaju eliminirati sve nule, a to je moguće izvesti tako da se u pojedine retke i stupce postepeno uvode brojevi 2,3 itd. koji predstavljaju redne brojeve novih kanala. Na taj se način pojedine nule iz matrice eliminiraju, jer nestaju istokanalne smetnje, ali se istovremeno mogu i druge nule generirati, jer se pojave nove istokanalne smetnje ali na 2.,3 itd. kanalu. Ako se ide korak po korak s time da je broj poništenih nula uvijek veći od novo nastalih, moguće je uz prikladnu strategiju relativno brzo eliminirati sve nule.

4. VELIČINA ZONE I NAČIN RASPOREĐIVANJA KANALA

4.1. Stalni raspored kanala

Ranije je spomenuto da se polumjer zone i/ili broj kanala po zoni treba prilagoditi kolebanju prometa prema geografskom području i vremenu. Ako se koristi konstantan i relativno velik polumjer zone za jedno šire geografsko područje, onda se zonama u gradskim predjelima trebaju pridodati grupe s većim brojem kanala, a seoskim grupe s manjim brojem kanala. U odnosu na jednolik raspored kanala takav sustav ima bolji koeficijent iskorištenja s time da taj raste što je veći odnos gustoće prometa u gradskom prema gustoći prometa u seoskom području (lit.4). S obzirom na veličinu zone malo je vjerojatno da će za vrijeme trajanja veze mobilna stanica napustiti zonu i izgubiti vezu zbog preslabog signala. Često se u velikim zonama postavlja i po nekoliko centralnih prijemnika na različitim mjestima unutar zone kako bi se kompenzirao manjak snage mobilnog odaši-

ljača.

Kod gustih mreža s manjim zonama vrlo je velika vjerojatnost da će mobilna stanica za vrijeme trajanja veze preći iz jedne u drugu zonu. To zahtijeva mogućnost da se mobilni primopredajnik prebaci na kanal nove zone. Osim toga mora se na neki način odrediti položaj mobilne stanice kako bi se vezala na najbližu centralnu stanicu. Kod prelaza iz zone u zonu može se dogoditi da su u novoj zoni svi kanali zauzeti pa se veza ne može produžiti. Ta se pojava na granici zona može smanjiti davanjem prioriteta, vezama koje su u toku, u odnosu na veze koje se žele uspostaviti. To zahtijeva relativno složeno upravljanje mrežom.

4.2. Promjenljivi raspored kanala.

Promjenljivi raspored kanala u osnovi predstavlja mogućnost da se bilo koji redni broj kanala može koristiti u bilo kojoj zoni. Kanali se dodjeljuju na temelju stanja sustava u času kada se pojavio zahtjev za uspostavljanjem veze, pri čemu se koristi određena strategija optimizacije iskorištenja cijelog sustava. Izbor kanala za određenu zonu vrši se unutar grupe kanala koji se smiju koristiti, a to su oni koji su od te zone udaljeni barem za minimalni razmak istokanalnih zona. Ako takav kanal ne postoji, veza se ne može ostvariti. Ako postoji više raspoloživih kanala, onda se izbor može provesti prema unaprijed utvrđenom kriteriju ili nasumce. Takav postupak zahtijeva obradu velikog broja podataka, što se može ostvariti jedino brzim digitalnim računalom, koje mora neprekidno obnavljati podatke o stanju cijele mreže. Ti podaci moraju sadržavati sve veze koje su završene, nove pozive koji se pojavljuju, uključivši identitet i lokaciju mobilne stanice, te sve prijelaze iz zone u zonu za veze koje su u toku. Zbog velikog broja stanja cijele mreže i velikog broja mogućnosti prijelaza iz jednog stanja u drugo, analiza dodjeljivanja kanala u promjenljivom rasporedu kanala je vrlo složena. U literaturi je poznat čitav niz takvih strategija dodjeljivanja kanala (lit. 5 i 7).

Najjednostavniji slučaj jest izbor prvog slobodnog kanala (FA. First Available) unutar raspoložive grupe. Koliko god ta

strategija bila jednostavna ona ima slične pa čak i jednake karakteristike kao i neke daleko složenije strategije.

Druga mogućnost zasnovana je na najboljem prostornom iskorisćenju, a izabire kanal koji se trenutno rabi u najbližoj zoni (NN-Nearest Neighbor) s time da taj razmak ne bude manji od minimalno dozvoljenog $D_{\min}$. Ako ima više takvih kanala, izabire se nasumce jedan od njih.

Kako bi se povećala mogućnost da se za vrijeme održavanja jedne veze kod prijelaza u susjednu zonu ne mora promijeniti kanal, koristi se strategija (NN+1) kao u prethodnom slučaju s time da se minimalni dozvoljeni razmak najbliže zone uveća za promjer zone. Ukoliko takav kanal ne postoji, uzima se samo $D_{\min}$.

Spomenute strategije mogu se koristiti kako za jedno-dimenzionalne mreže tj. one koje pokrivaju samo određene magistralne pravce duž određenih prometnica (ceste, željezničke pruge i sl.) tako i za dvodimenzionalne, koje pokrivaju veće geografsko područje. RING-strategiju moguće je upotrijebiti samo u dvodimenzionalnim mrežama. Naime, ispituju se aktivnosti kanala u svim zonama koje su na udaljenosti $D \geq D_{\min}$. Te zone čine jedan "prsten" čiji je geometrijski oblik jednak obliku zone (trokut, kvadrat, šesterokut). Onaj kanal, koji se trenutno rabi u najviše zona prstena, izabire se za vezu koju treba uspostaviti. Zbog jednostavnosti simulacije na računalu je u lit.6 korištena kvadratna zona, što bitno ne djeluje na rezultate.

Mobilna mreža mora biti tako izvedena da broj izgubljenih veza ne prelazi nekoliko posto. Ako se utvrdi broj raspoloživih kanala, polumjer zone i minimalni razmak istokanalnih zona, onda je NN-strategija najpovoljnija. Naime, ona može ostvariti najveći promet, najmanji broj izgubljenih veza i najmanji broj prekinutih veza koje bi se trebale nastaviti u susjednoj zoni. Iako NN+1-strategija povećava broj veza koje se nastavlja u istom kanalu kod prelaza u susjednu zonu, ipak je ukupan broj veza, koje se prekidaju, veći nego kod NN-strategije. FA-strategija je vrlo bliska po kvaliteti NN+1-strategiji. Za sve strategije je broj potrebnih kanala po jednom centru zone manji nego kod stalnog rasporeda, ako se promatra manji broj pokušaja uspostavljanja veza u minuti po jednom centru. Kod većih zahtjeva za uspostavljanjem veza ta se razlika sve više gubi,

jer je broj potrebnih kanala u oba slučaja velik.

Ako se pogleda broj izgubljenih poziva u promjenljivom rasporedu kanala, onda je on mali sve dok ponuđeni promet ne pređe određenu kritičnu točku. Iza toga naglo raste broj izgubljenih poziva uz neznatan porast prometa, tako da je uz veći broj izgubljenih poziva promet kod stalnog rasporeda kanala veći. Ta pojava je jače izražena kod dvodimenzionalnih mreža i nastupa kod nižih vrijednosti broja izgubljenih poziva, ali još uvijek reda veličine 5 do 10%.

Postoje još metode kod kojih je grupa kanala stalno pridodana svakoj zoni a ostali raspoloživi kanal/i se pridodaju prema određenoj strategiji s time da postoji i mogućnost da se za vrijeme održavanja veze izvrši promjena kanala ovisno o trenutnom stanju mreže i zahtjevima za uspostavljanjem novih veza. Uzevši u obzir sve opisane metode dodjeljivanja kanala u promjenljivom rasporedu, može se zaključiti da je za gubitke reda veličine 1 do 5% moguće ostvariti povećanje zauzetosti kanala a time i prometa za 25 do 50% u odnosu prema stalnom rasporedu kanala.

5. ZAKLJUČAK

S obzirom da je u mobilnim komunikacijama na kopnu jedan od prvorazrednih problema optimalno iskorištenje radiofrekvencijskog spektra, to je u ovom radu analiziran taj problem. Pokazano je da je ukupni koeficijent iskorištenja, osim o radiofrekvencijskom spektru, ovisan i o prostoru i vremenu. Diskutirani su modulacioni postupci kao i smetnje koje nastaju unutar samog sustava. Analizirana je veza između konfiguracije mreže i potrebnog broja kanala da bi se ostvario što veći ukupni koeficijent iskorištenja. Prikazana je mogućnost korištenja električkog računala pri određivanju pokrivenosti zone i uklanjanju istokanalnih smetnji. Analiziran je stalni raspored kanala u mreži i neke od strategija promjenljivog rasporeda kanala. Izvršena je usporedba pojedinih rasporeda i zaključeno je da promjenljivi raspored kanala može znatno povećati ukupni koeficijent iskorištenja mobilnog radiokomunikacijskog sustava.

6. LITERATURA

- 1) "Nikola Tesla-Lectures, Patents, Articles"
Published by Nikola Tesla Museum, Beograd, 1956.
- 2) Binz R., Kleimeier H.J.: "Die nichtöffentlichen beweglichen Landfunkdienste", Der Fernmelde-Ingenieur, Heft 1, 1970.
- 3) C.C.I.R. Study Groups Period 1974-78, Doc. 8/71, Nov. 1975.
- 4) Colavito C.: "On the Efficiency of the Radio Frequency Spectrum Utilization in Fixed and Mobile Communication Systems", Alta Frequenza, vol. 43, no. 9, Sept. 1974, s. 640-651.
- 5) Cox D.C., Reudink D.O.: "A Comparison of Some Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems", IEEE Trans. on Comm., vol. COM-20, no. 2, 1972, s. 190-195.
- 6) Cox D.C., Reudink D.O.: "Dynamic Channel Assignment in Two-Dimensional Large-Scale Mobile Radio Systems", Bell System Techn. J., vol. 51, Sept. 1972, s. 1611-1630.
- 7) Cox D.C., Reudink D.O.: "The Behavior of Dynamic Channel-Assignment Mobile Communications Systems as a Function of Numbers of Radio Channels", IEEE Trans. on Comm., vol. COM-20, no. 3, 1972, s. 471-479.
- 8) Dadson C.E., Durkin J., Martin R.E.: "Computer Prediction of Field Strength in the Planning of Radio Systems", IEEE Trans. on Vehicular Techn., vol. VT-24, no. 1, 1975, s. 1-8.
- 9) Edwards R., Durkin J.: "Computer prediction of service areas for v.h.f. mobile radio networks", Proc IEE, vol. 116, no. 9, Sept. 1969, s. 1493-1500.
- 10) Edwards R., Durkin J., Green D.H.: "Selection of intermodulation-free frequencies for multiple-channel mobile radio systems", Proc. IEE, vol. 116, no. 8, Aug. 1969, s. 1311-1318.
- 11) Freytag H.H., Haas R.: "Über ein Verfahren zur Bestimmung der minimalen Kanalzahl in flächenhaften Netzen des nicht-öffentlichen beweglichen Landfunks", Nachrichtentechnische Zeitschrift, Jahrgang 18, H. 10, 1965, s. 565-568.

Lojze Vodovnik

Alojz Kralj

Fakulteta za elektrotehniko

Ljubljana

TESLA IN JUGOSLOVANSKA MEDICINSKA ELEKTRONIKA

Obravnavana je vloga Tesle pri nastajanju medicinske elektronike. Po kratkem pregledu današnje industrijske proizvodnje elektronskih naprav za medicino v Jugoslaviji so prikazane tudi naše težnje in rezultati na področju raziskav.

TESLA AND YUGOSLAV MEDICAL ELECTRONICS

The role of Tesla in the development of medical electronics is discussed. Contemporary trends and problems in the Yugoslav medical electronics industry are briefly reviewed, and related research presented.

TELSA IN JUGOSLOVANSKA MEDICINSKA ELEKTRONIKA

1. Uvod

Paleta dejavnosti, ki so zanimale Nikolo Teslo, je za nas nepojmljivo široka. Zajemala je vse od tehniških, socioloških in filozofskih ved do izvenčutnega zaznavanja (ESP - extrasensory perception). Zato se ne čudimo, da ga je zelo zanimalo življenje, njegov nastanek, smisel in usoda. Takole pravi v enem svojih člankov iz leta 1900 (7): "Of all the endless variety of phenomena which nature presents to our senses

there is none that fills our minds with greater wonder than that inconceivably complex movement which, in its entirety, we designate as human life. Its mysterious origin is veiled in the forever impenetrable mist of the past, its character is rendered incomprehensible by its infinite intricacy, and its destination is hidden in the unfathomable depths of the future. Whence does it come? What is it? Whither does it tend ? are the great questions which the sages of all times have endeavoured to answer." *

Ker pa je Teslova osnovna znanstvena dejavnost le veljala elektrotehniko, je - upošteva je njegov ustvarjalni duh - povsem razumljivo, da je iskal vpliv svojih elektrotehniških odkritij tudi na življenje in človeka. Po njegovem lastnem pričevanju (6) je prve poskuse o vplivu visokofrekvenčnih tokov na človeško telo opravljal že leta 1889. Ugotovil je, da so neškodljivi, da notranje pregrevajo telo ter da delujejo uspavalno. Čeprav kot inženir ni mogel podati medicinskih indikacij za uporabo teh tokov, je vendarle z njemu lastno jasnovidnostjo že leta 1891 predvideval njihovo elektroterapevtsko uporabnost. Pri tem se je povsem zavedal, da je za uspešno delo na tem področju nujno tesno sodelovanje med zdravnikom in inženirjem. Njegove misli o tem iz l. 1898 so aktualne še danes in bi mogle biti vodilo našim sedanjim de-

* "Od brezmejne raznolikosti pojavov, s katero se narava predstavlja našim čutilom, ni nobenega, ki bi izpolnil našega duha z večjim občudovanjem, kot je to nepojmljivo kompleksno gibanje, ki mu v vsej celovitosti pravimo človeško življenje. Njegov skrivnostni izvor je zakrit v meglici preteklosti, ki bo ostala nepredirna za vekomaj, zaradi neskončne zapletenosti postanejo njegove značilnosti nedoumljive, njegova usoda je skrita v neizmerljivih globinah bodočnosti. Od kod prihaja? Kaj je ? Kam je namenjeno? , to so velika vprašanja, katerim so skušali najti odgovore modreci vseh časov ."

javnostim na področju biomedicinske tehnike. Takole je dejal (6) :

"While it remained for the physician to investigate the specific actions on the organism and indicate proper methods of treatment the various ways of applying these currents to the body of a patient suggested themselves readily to the electrician . " **

Ena od komponent tragičnosti Teslove osebnosti je bila njegova brezbriznost do komercialne uveljavitve in uporabnosti njegovih odkritij . Zato so ga - podobno kot pri vrtilnih poljih in radiofrekvenčnem prenosu informacij - tudi pri uporabi visokofrekvenčnih tokov v medicini izigrali in pozabili. Njegove metode pregrevanja človeka in ideje o uporabi v kirurgiji so se v naslednjih letih pojavile pod različnimi imeni posnemalcev, ki so le z manjšimi modifikacijami ponujali zdravja željnim bolnikom Teslove izume kot svoje . Te zgodovinske krivice sta po svojih močeh poskušala popraviti Bokšan (1) in Nenadović (4). Na žalost so njuni napor ostali brez večje mednarodne odmevnosti. Današnji učbeniki o elektroterapiji z visokofrekvenčnimi tokovi omenjajo imena kot d'Arsonval, Wien, Oudin , le redko pa srečamo ime našega velikana elektrotehnike (2). Tudi k izboljšanju rentgenske tehnike je Tesla prispeval številne izboljšave, kar mu je priznal tudi sam Röntgen (1) . Kot kaže, je Tesla eksperimentiral z x-žarki celo pred Röntgenom, le da tega ni uspel pravočasno ovrednotiti. Kakršnekoli so že zgodovinske podrobnosti, brez dvoma ostane trditev, da je Tesla eden od ustanoviteljev medicinske elektronike, saj predstavljajo današnje aparature za diatermijo, mikrovalovno gretje, elektrokirurgijo in elektrokoagulacijo "železni repertoar" sodobnih elektrote-

** "Medtem ko preostane zdravniku, da razišče specifično delovanje (visokofrekvenčnih tokov) na organizem ter da pokaže ustrezne načine zdravljenja, mora elektrotehnik poiskati različne možnosti uporabe teh tokov na bolniku " .

rapevtskih pripomočkov.

Ker je očitno, da doslej Tesli nismo uspeli pridobiti ustreznega priznanja v mednarodnih elektromedicinskih krogih, menimo, da tudi v bodoče ni realno pričakovati bistvenih sprememb. Preveč buren je razvoj sodobne elektrotehnike, preveč novih imen se pojavlja ob odkritjih zadnjih desetletij, da bi se inženirji in zdravniki, ki nimajo narodnostno - čustvenih vezi do Tesle, zamislili ob aparaturah, ki so nam danes same po sebi umljive, so pa potomci njegovih izumov. Zato menimo, da ob 120-letnici njegovega rojstva ne bi smeli preveč jadikovati nad krivičnostjo sveta, ki Tesli nikoli ni dal priznanja, kakršnega so bili deležni njegovi sodobniki, kot npr. Edison in Marconi. Menimo, da lahko obletnico njegovega rojstva bolj dostojno proslavimo z obujanjem njegovega duha, kot s slavljenjem njegovega imena. Zato nam bodi dovoljeno, da preskočimo skoraj stoletje in pogledamo, kaj se dogaja in kakšne so perspektive v današnji Jugoslaviji na področju medicinske elektronike.

2. Industrijska proizvodnja

Sodobne variante Teslovih generatorjev za medicino proizvajajo danes vsaj v treh jugoslovanskih podjetjih : Elektronska industrija, Niš, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Ljubljana ter Elektromedicina, Ljubljana. Mimo teh proizvajalcev pa obstaja še vrsta drugih, ki izdelujejo naprave za merjenje srčnih in možganskih napetosti ter merilnike raznih fizioloških veličin.

Rentgenske aparate in električne stimulatorje proizvajata predvsem EI Niš ter Elektromedicina, ostale aparature pa srečamo v proizvodnih programih Radio-industrije, Zagreb, Iskre, Zavoda za rehabilitacijo, Ljubljana, ter Gorenja.

Čeprav lahko kupimo danes večino rutinskih elektromedicinskih aparatov doma, je vendarle za našo tozadevno industrijo značilno, da je raz -

drobljena, neorganizirana, neuskaljena in brez pravega razvojnega programa. Kljub intelektualnemu in materialnemu potencialu, ki nam je v Jugoslaviji na voljo, nismo v stanju prevzemati kompletnega inženiringa za nove bolnice z domačo opremo, temveč neusmiljeno uvažamo opremo in znanje, ki ga lahko ali bi ga lahko našli doma.

Čeprav imamo opraviti z določeno proizvodno in konceptualno zmedo na področju medicinske elektronike, je treba vendarle poudariti, da ima Jugoslavija zelo realne možnosti, da postane pomemben proizvajalec medicinske opreme. Nekatera od naštetih podjetij že imajo solidno tradicijo in mednarodno kvaliteto. Ob splošnem naraščanju življenjske dobe, boljše zdravstvene oskrbe ter želji po izboljšani kvaliteti življenja, postane hitrejši razvoj medicinske instrumentacije neizogiben. Ob številnih novih investicijah v zdravstvene domove in bolnice bi torej kazalo v največji možni meri izkoristiti domače zmogljivosti. Smo dežela, ki ni posebno bogata s surovinami in energijo. Zato je še posebej pomembno, da gojimo področja, ki ne terjajo mnogo materiala, temveč predvsem organizacijskih sposobnosti in pameti. Medicinska elektronika je prav gotovo eno takih področij in menimo, da je prišel čas, ko bo dežela, ki je rodila enega od pionirjev medicinske elektronike, tudi s sodobno industrijsko proizvodnjo medicinskih aparatov dokazala, da postaja razvita dežela (5).

3. Raziskave

Jugoslaviji nikoli ni manjkalo ustvarjalnih glav in pridnih rok - zelo pogosto pa nam manjkajo dobri organizatorji in solidna tehnologija. To dokazuje tudi današnje stanje na raziskavah medicinske elektrotehnike. Oglejmo si nekaj tipičnih zgledov.

Že več kot petnajst let bo minilo, odkar sta prof. Tomović in prof. Rakić iz Beograjske elektrotehniške fakultete in Instituta "Mihailo Pupin" predlagala novo vrsto elektronske proteze, ki je bila zaradi zmožnosti kompleksnih gibov prstov znatno boljša kot vse druge znane proteze. Kmalu

je postala "Beograjska roka" znana po vsem svetu in vendarle je nismo uspeli proizvajati doma.

Tudi hodeči robot - eksoskelet, ki ga je razvila skupina raziskovalcev na Inštitutu "Mihailo Pupin" pod vodstvom dr. Vukobratovića, dobro poznajo danes v Sovjetski zvezi, Združenih državah Amerike in na Japonskem. V Jugoslaviji pa je zanimanje zanj omejeno in nekaj navdušenih inženirjev in zdravnikov, ki vidijo v robotu eno od možnosti za hojo ohromelih bolnikov.

Naša zagrebška skupina medicinskih elektronikov s Fakultete za elektrotehniko se prav tako že poldrugo desetletje otepa s tipičnimi "našimi" težavami : profesor Šantić in sodelavci skušajo prodreti z razvojem in proizvodnjo jugoslovanskega merilnika možganskih valov ter drugimi aparaturami za elektrodiagnostiko. Kljub temu, da deluje danes že preko 100 zagrebških elektroencefalografov doma in tudi v inozemstvu, pa bi le težko priznali, da so raziskovalci dobili ustrezno družbeno in industrijsko podporo za sistematski razvoj in proizvodnjo elektronskih aparatov za diagnostiko.

Morda se je v proizvodnem smislu najdlje dokopala ljubljanska skupina, ki se je lotila razvoja aparatov za funkcionalno električno stimulacijo.

Tu gre za področje, kjer z miniaturnimi elektronskimi stimulatorji dražimo ohromele mišično-živčne sisteme in tako dosežemo vsaj delni povratek koristnih in uporabnih gibov. Najbolj znan je danes tako imenovani peronealni elektronski stimulator, imenovan po živcu, ki vodi signale k dvigalnim mišicam na nogi. Uporabljajo ga bolniki z možganskimi poškodbami, katerih glavna posledica je ohromelost tiste skupine mišic, ki dviga stopalo. Zavod za rehabilitacijo v Ljubljani je doslej proizvedel več kot 1500 elektronskih peronealnih stimulatorjev in ima zaenkrat nekaj "svetovni monopol", saj vsi drugi proizvajalci skupaj niso zgradili več kot kakih 500 stimulatorjev. S tem pa nikakor nočemo reči, da je prenos raziskav v proizvodnjo zadovoljiv.

Prototipi za stimulacijo roke, večjega števila mišic noge ter zaporne-
ga mišičja urinskega mehurja še zmeraj čakajo na serijsko proizvod-
njo. Z zavlačevanjem omogočamo tuji konkurenci, da se okorišča z
našimi raziskovalnimi rezultati. Res je, da posebej na področju me-
dicinske elektronike ne kaže pretirano poudarjati komercialnega vidika,
saj nam na koncu koncev gre predvsem za to, da dobi bolnik čim ce-
nejši in čim boljši pripomoček. Kljub temu pa je počasnost v akciji
in nezaupanje do lastnih dosežkov naše industrije nerazumljiva, a na
žalost dokaj tipična.

Gornje črnoglede ocene so včasih morda prehude, saj so nastale za-
radi iskrene želje po čim hitrejšem napredovanju v verigi : zamisel-
poskus-prototip-izdelek-tržišče-bolnik. Zato je le pošteno, če odstavek
zaključimo v svetlejših barvah : dejstvo je, da je Jugoslavija verjetno
ena redkih dežel v razvoju, ki sploh ima lastno medicinsko elektronsko
industrijo in da proizvaja nekatere aparature, ki bi bile v čast tudi
vsaki razviti deželi. Prvi obrisi vsklajevanja in sodelovanja med pro-
izvajalci so že vidni. Raziskovalne skupnosti skušajo s krediti premos-
titi najdražji prepad v zgoraj omenjeni verigi, namreč prepad med
prototipom in končnim izdelkom. Tako smo torej prepričani, da bodo
naša razmišljanja ob 130-letnici Teslovega rojstva mnogo bolj optimis-
tična, kot so danes.

4. Zaključek

Ko bi se Tesla danes spet pojavil med nami, kaj bi ga začudilo, kaj
razveselilo? Ali bi bil presenečen, da njegova domovina proizvaja vi-
sokofrekvenčne in mikrovalovne generatorje za fizioterapijo in elektro-
kirurgijo, da vgrajujemo miniaturne elektronske vzpodbujevalnike v sr-
ce, mehur, roke, noge, hrbtenjačo in celo možgane? Morda bi se
začudil na d elektronskimi možgani, ki so danes sestavni del kompli-
ciranih medicinskih poskusov, avtomatske diagnostike in postaj za in-
tenzivno nego? Čudil bi se našim dosežkom na področju rentgenske

tehnike in nuklearne medicine , a morda bi se najbolj razveselil svojevrstnega načina fotografiranja, znanega pod imenom Kirlianovo fotografiranje, kjer se posredno uporablja kot "izvor svetlobe" Teslov transformator. Napetost s tega transformatorja priključimo na živo ali neživo telo ter fotografiramo sevanje, ki nastane zaradi korone ob robovih telesa. Nekateri raziskave kažejo, da so barve sevanja odvisne od biološkega in psihičnega stanja objekta, ter da je mogoče opazovati takoimenovano "auro". Kot vemo (3), se je Tesla zelo zanimal za parapsihologijo in imel tudi sam nekatere prepričljive izkušnje, n. pr. ob smrti svoje matere. Zato bi mogel z zadovoljstvom ugotoviti, da je pojem Teslovega transformatorja danes še najbolj znan prav raziskovalcem Kirlianove fotografije.

In kaj bi lahko bilo Teslovo veliko razočaranje v današnjem svetu? Morda dejstvo, da smo svoje okolje marsikje že katastrofalno uničili, ali da vodimo vojne v bistvu še prav tako, kot pred stoletji : človek proti človeku. Tesla je bil humanist in je želel, da bi njegovi izumi človeštvu lepšali in lajšali življenje. Bil pa je tudi patriot in zato pripravljen vložiti svojo duhovno energijo po potrebi tudi v izume za obrambo domovine. Vendar je preveč spoštoval človekovo življenje, da bi ga nemarno uničeval v vojnah. Zato je upal, da bodo bodoče vojne le bitke med inteligentnimi roboti. Sam je razvil prvi daljinsko krmljeni avtomat in z izboljšanjem takih avtomatov je upal, da bo lahko človek izločen iz vojne. Leta 1900 je menil (7) : "The loss of life will become smaller and smaller, and finally the number of the individuals continuously diminishing, merely machines will meet in a contest without bloodshed, the nations being simply interested, ambitious spectators. When this happy condition is realized, peace will be assured. The future will either bear out or disprove these views. My ideas on this subject have been put forth with deep conviction but in a humble spirit . " ***

Velik vizionar je bil Tesla, in večino svojih izumov bi lahko danes videl izpopolnjenih do nespoznavnosti. V njegovi veri pa, da se bodo tudi medčloveški odnosi razvili tako hitro kot tehnika, ga moramo razočarati.

*** "Izguba življenj se bo zmanjševala in ker bo tudi število ljudi (v bitkah) zmeraj manjše, se bodo končno borili le stroji brez preli-vanja krvi, narodi pa bodo navdušeni opazovalci, ki bodo z zanimanjem spremljali izid boja. Ko se bodo uresničili ti srečni pogoji, nam bo mir zagotovljen. Bodočnost bo potrdila ali ovrgla te poglede. Svoje misli o tem problemu sem izrazil z globokim prepričanjem, toda v ponižnem duhu. "

LITERATURA

1. S. Bokšan, Nikola Tesla und sein Werk, Deutscher Verlag für Jugend und Volk, Leipzig, 1932
2. Licht S., Editor, Therapeutic Electricity and Ultraviolet Radiation, E.Licht Publisher, New Haven , Connecticut 1967
3. O'Neill J., Življenje Nikole Tesle, Državna založba Slovenije, Ljubljana, 1951
4. Nenadović L., Über die Anwendung der Tesla Ströme in der medizinischen Praxis, Nikola Tesla, spomenica povodom njegove 80-godišnjice. Izdalo Društvo za podizanje Instituta Nikole Tesle, Beograd 1936, str. 349 - 359.
5. A. Šantić, A.Kralj, S.Pejović, Razvoj elektronske biomedicinske instrumentacije v SR Srbiji, Hrvatski in Sloveniji. Elektrotehniški vestnik, v tisku.
6. Tesla N., High Frequency Oscilators for Electro-Therapeutic and other Purposes, Read at the eight annual meeting of The American Electro-Therapeutic Association, Buffalo, N.Y., Sept. 13th 1898. Ponatis v Nikola Tesla, Lectures, Patents, Articles, Published by Nikola Tesla Museum, Beograd, 1956, L-156.
7. Tesla, N., The Problem of Increasing Human Energy, The Century Illustrated Monthly Magazine, June 1900. Ponatis v Nikola Tesla, Lectures, Patents, Articles, Published by Nikola Tesla Museum , Beograd, 1956 A-109.
8. Nikola Tesla, Izdala Elektrotehniška zveza Slovenije, Ljubljana 1970.

XI. Poglavlje

TELEKOMUNIKACIJE

Prof.dr Zlatko Smrkić
Elektrotehnički fakultet
Zavod za visokofrekventnu
Tehniku, Zagreb

SUVREMENI PROBLEMI KOMUNIKACIJA

U suvremenom stanju komunikacija sve se više osjeća potreba za interdisciplinarnim načinom istraživanja. U tom smislu razmatraju se neki problemi društvenih implikacija i međusobnih utjecaja života i čovjeka i tehničkih mogućnosti ostvarenja. Ukazuje se na sadržaj i karakter potrebnih istraživanja. U tom smislu su obrađeni neki problemi prijenosa video signala.

TOPICAL COMMUNICATIONS PROBLEMS

The need for an interdisciplinary approach to research is being felt at an ever increasing rate in present-day communications. This involves a number of social implications, and man-life-feasibility interactions. The substance and character of research required in this field are discussed in terms of some video-signal transmission problems.

U nemogućnosti da se u kratkom izlaganju ukaže na cjelokupni širok raspon suvremenih dostignuća i razvojnih tendencija današnjih komunikacija te na probleme s tim u vezi, bit će ovdje izneseno samo ono osnovno što otvara probleme za potrebnim istraživanjima u zajednici sa znanstvenim područjima, koja do jučer nisu bila u dovoljnoj vezi s istraživanjima na području komunikacija elektromagnetizma. Treba odmah istaknuti da među bitne karakteristike suvremenog života i svijeta idu kretanja u sve naglijem razvoju elektrokomunikacija i informacione tehnologije, koje nose u stvari značajku stvarne revolucije. Od prvih pokusa prijenosa informacije radiokanalom, koji je proveo Nikola Tesla, pa do današnjih dana nastaje sve nagliji razvoj radiokomunikacija. Taj put od dugih valova do suvremenih mikrovalova i optičkih valova, od elektronke preko tranzistora do integrirane elektronike, do magnetrona, klistrona i cijevi s putujućim valom, do radara i radionavigacije, multipleksnih sustava i televizije visoke rezolucije, nije do danas stao. Naprotiv, smanjenje troškova elektroničkih uređaja, uvođenje digitalne tehnologije, elektroničkih računala za pohranjivanje i obradu podataka, ostvarivanje terminala i satelitskih komunikacija, tehnike širokopojasnih komunikacija pružaju sasvim nove mogućnosti u životu čovjeka i društva. To uzrokuje promjene u komunikacionim navikama, prelazi okvire samo tehničkog aspekta i zahtijeva ocjenu društvenih potreba i mogućnosti. To, međutim, otežava ujedno i jasan uvid u cjelokupnu, mogli bismo reći, višedimenzionalnu problematiku. Javljaju se opravdano nova pitanja, i danas još nema zadovoljavajućih odgovora. Ta je pitanja moguće prikazati na temelju suvremenih dostignuća i mogućnosti koje ona pružaju. Navedimo nekoliko osnovnih.

Radiodifuzna nastojanja u pogledu zahtjeva da znatna većina pučanstva (u mnogim slučajevima 90% ili više) ima mogućnost izbora između istog broja programa, predstavlja i danas još jedan od glavnih ciljeva tehničke osnove masovnih medija. U tu svrhu služi mreža odašiljača i radiorelejnih veza. Samo tamo gdje je cilj postavljen komercijalno, ili zbog nacionalnih granica, postoje zahtjevi za ograničenim

postotkom pokrivanja. U tom smislu postoji zahtjev da sustav bude koncipiran tako da dozvoljava konstrukciju prijemnika s razumno niskom cijenom koštanja. Tome se donekle suprotstavlja drugi zahtjev, a taj je da radiokomunikacioni sustav predstavlja optimalno korištenje frekvencijskog spektra. Tehnološki napredak osnova je i uvjet uspješnog kompromisnog rješenja za oba zahtjeva. Međutim, taj napredak ne smije biti takav da uvođenjem novina učini neupotrebljivim postojeće prijemnike. To je poznati problem kompatibilnosti, čije je rješenje već ostvareno u kromatskoj televiziji i stereofoniji za FM sustave. Međutim, probleme sigurno treba promatrati ne samo kao elektrokomunikacione nego i kao probleme masovnog medija. U tom smislu je televizija posebno jedan od dominantnih faktora današnjeg društva. U tehničkom pogledu ona je kompleksnija, dakle i skuplja, za proizvodnju, pohranjivanje, prijenos i razdiobu od samo tonskog prijenosa. To ima utjecaj jednako na suvremena rješenja kao i na budući razvoj. Suvremena kretanja mogu dati prednost tonskoj radiodifuziji samo u neposrednoj i izravnoj informaciji uz nisku cijenu koštanja, programima za pokretne slušatelje kao i specifičnim programima radiodrame, glazbe i slično. U svakom slučaju budućnost radija i televizije ne zavisi samo o tehničkom aspektu.

Iskorištenje frekvencijskog spektra ukazuje na sve veće poteškoće zbog otvaranja novih službi. Tu je u svakom slučaju nužno koristiti, u prvom redu, tehničko rezoniranje. Tonski dio tu i nije znatan problem, jer u području od 150 kHz do 800 MHz, samo 2% spektra otpada na ton u odnosu na televiziju. Samo u metarskom i decimetarskom valnom području je do sada u Evropi u izvjesnom smislu postojao harmoničan razvoj, gdje se uspjelo izvršiti planiranje pravovremeno (Stockholm 1961). U dugovalnom i srednjevalnom području, gdje je površinski val dominantan, poteškoću čini zahtjev visokih odašiljačkih točki s jakim snagama, ali ne dovoljno jakim za dan da bi bile optimalne, a prejake za noć.

Satelitska radiodifuzija može u budućnosti znatno olakšati problem programske višestrukosti. Na 12 GHz bilo bi

moгуće tri do četiri puta povećati televizijski program i do dvadeset puta tonski. U takvom slučaju se očekuje da zemaljska difuzija bude ograničena samo na regionalni i lokalni karakter. Daljnja proširenja na 41-43 GHz i 84-86 GHz (EHF pojas) nisu još danas dovoljno saglediva.

Jedan od budućih puteva povećanja kapaciteta frekventcijskog spektra mogao bi biti modulacioni postupak. Postavljeni zahtjev za jeftinim prijemnicima može se održati suvremenom integriranom elektroničkom tehnologijom, pa postoji mogućnost uštede spektra izborom modulacije kao i simultanom modulacijom jednog nosioca. Tu sinhroni demodulatori ukazuju na prednost pred starim anvelopnim detektorima. Bit će vjerovatno moguće riješiti kompatibilnost s jednobočnim prijenosom ili nezavisnim prijenosom u bočnim pojasevima, što udvostručuje postojeći kapacitet. Ujedno modulacija podnosioca s manje kvalitetnim signalom za posebne svrhe daje neke nove mogućnosti u metarskom području FM sustava. U kromatskoj televiziji je kompatibilnost ostvarena, dok stereoskopska televizija nema jasnu perspektivu zbog potrebe nove modulacione tehnike. Vjerovatno će i iskorištenje vertikalnog potisnog impulsa u televiziji dati mogućnosti za prijenos čitavog niza informacija.

U pogledu rasprostiranja elektromagnetskog vala može se danas uočiti nekoliko područja koja su još otvorena. To su utjecaj jonosfere na radiokomunikaciju zemlja-prostor, troposferska radiometeorologija, gradski utjecaji i utjecaji neravnog terena te jonosferske modifikacije koje proizlaze iz odašiljača vala velike snage. Svima je zajednički utjecaj prirode, a on mora biti uzet u predviđanju ostvarenja radiokomunikacija. Posebno se tu radi o utjecaju atmosferskog gušenja (kiša, snijeg, oblaci i slično), raspršenje vala u nižoj atmosferi i jonosferi, refrakcija, kanali i višestruki put, frekvencijski ovisna disperzija, kolebanja amplitude i faze, polarizacije i kuta dolaska kao rezultati turbulencija i nepravilnih struktura u atmosferi i jonosferi, te utjecaji građevina. Sve je to frekvencijski ovisno, a ovisi i o korištenom sistemu. Problemi su vezani na suvremena razvojna kretanja.

Razvojem digitalne tehnike za radiorelejne veze područje istraživanja je nešto različitiije od istraživanja u analognoj tehnici. Traže se novi parametri, i to u odnosu na grešku umjesto vrijednosti šuma, PCM prag umjesto FM prag, te nestajanje (fading) uslijed kiše umjesto višestrukog puta. Već danas se koriste činjenice da je u donjem decimetarskom području potrebna manja snaga u digitalnoj tehnici nego u analognoj, da postoji manja osjetljivost na intermodulaciju uslijed refleksije te veća efikasnost korištenja spektra. Uočava se znatno manji iznos troškova elektroničkih komponenata digitalnih komunikacija od troškova analognih elektroničkih komponenata. U pogledu komunikacija podataka postoji nužna integracija tehničkih i ekonomskih aspekata ("Eurodata" 1971). Kroz 10 godina očekuje se takav rast da će se udeseterostručiti broj centara na javnu mrežu, kao i broj bita koji će se prenositi. Rješenja će biti grupirana kao odzivni sistemi na zahtjev, sistemi dijaloga i sistemi kolekcije i distribucije. Brzina se predviđa između 50 b/s do 50 kb/s. Sekvencije kodnih elemenata fiksne dužine do 600 kb/s. Time se vidi da prijenos podataka doživljava jedan od najvećih razvoja u svijetu. Kvantitativni porast u posljednjih 15 godina u industrijskim zemljama iznosi često više od 50%. Suvremeni problem je u normiranju općih karakteristika za omogućavanje međunarodnog prijenosa podataka, uključujući široki mogući raspon terminala, te modela za priključak na standardiziranu mrežu.

Međunarodna reguliranja korištenja radiofrekvencijskog spektra postaju sve značajnija zbog sve većeg rasta radio-komunikacijskih službi. Dakako, ne samo zbog reguliranja međunarodnih nego i pojedinačnih nacionalnih područja, koja interferiraju međusobno u troposferskom i jonosferskom rasprostiranju. Satelitske komunikacije imaju posebno mjesto u tom dogovoru, iako čak i u blizini zemaljskih stanica interferencije nisu znatne. Uz planiranje spektra potrebno je i planiranje mjesta u geostacionarnoj orbiti. Od satelitskih komunikacija očekuju se veze s predjelima veze, kojima je inače pristup otežan, kompjuterske komunikacije, prijenos

podataka, telekonferencijska služba, služba videofona, udaljeni tisak i slično.

Putem podmorskih kabela predviđaju se ostvarenja od 4000 kanala (Amerika-Evropa 3 kHz širine) i 3900 kanala (Engleska-Evropa 4 kHz širine).

Iako današnja telefonska mreža predstavlja i nadalje osnovni oblik svjetskih telekomunikacija, ona doživljava svoju transformaciju, posebno u pogledu brzog prijenosa podataka, što iziskuje novu mrežu, dok se za prijenosne sustave očekuju u budućnosti valovodne i optičke veze. Te će veze sniziti troškove po kanalu. Za prijenos s tim vezama moguće je digitalizirati i potrebne akustičke i video signale, što omogućuje minimum izobličenja i šuma, a pruža osnovu za vremensku komutaciju. Uz uvjet da se postigne bolja koordinacija između planiranja mreža, razvoja sistema i razvoja tehnologije, mogla bi digitalna komutacija biti uvedena u razvijenim sredinama do 1980. godine.

U pogledu korištenja radiokomunikacija u zrakoplovstvu nastojanja idu i dalje za osiguranje redovitog sigurnog i brzog zračnog prometa. Tendencija ide u tom smjeru da upravljač bude u mogućnosti donositi relevantne odluke, koje se odnose na lijet i sigurnost, na temelju dostavljenih mu informacija. U tom vidu radiokomunikacija zemlja-zrak podliježe svim problemima kao i zemaljska veza i to u pogledu razmaka kanala, interferencije kokanala, interferencije sa susjednim kanalima, selektivnosti, ukrštene modulacije i slično.

Mobilne radiokomunikacijske veze omogućuju komunikaciju između automobila, željeznica i brodova s jedne strane i fiksnih radiostanica s druge strane. Kako je spektar frekvencija ograničen, a potrebe sve veće, mobilnim vezama stoji na raspolaganju relativno uski pojas frekvencija. Služba radiopoziva se sastoji u tome da se sa centralnog mjesta preko više odašiljača šalje AM frekvencijski kodni signal, koji u prijemniku izaziva akustički ili optički efekt. Već danas ostvarena, takva služba u Evropi omogućuje da se sa 4 zone, koje se ponavljaju, može svakom prijemniku pridodati 4 kode signala, čije je

značenje unaprijed dogovoreno. Budući je veza jednosmjerna, pozvani treba otići na javnu govornicu, odakle zove natrag. Takva služba radiopoziva je u izgradnji. Nasuprot tome predviđa se i dvosmjerna radiomobilna veza koja omogućuje dijalog, što predstavlja proširenje javne telefonske veze na mobilne jedinice.

Već na postojećoj mreži današnjih telekomunikacija uvode se novi telekomunikacioni oblici koji se ugrađuju izravno ili uz neznatnu tehničku promjenu. Veći dio tih oblika je u području poslovnih komunikacija, kao što su komunikacija teksta i komunikacija nepomičnih slika. Tu su nekodirani izvodi signala pri kojima nije samo sadržaj nego i oblik prikazivanja reproduciran. Kod toga je original točkasto analiziran na odašiljačkoj strani, a sastavljen natrag na prijemnoj strani. Raspored sivog klina je moguć, ali poskupljuje opremu i povećava trajanje prijenosa. Postoji ovisnost o količini prenesenih točaka i slika u jedinici vremena kao i o raspoloživoj širini kanala.

Kabelska televizija je raspodjela difuznog programa preko mreže kabela, u kojima se prenose normalnim načinom bežično neprimani ili lokalno proizvedeni programi. Prva iskustva pokazuju da se ponuđene mogućnosti lokalnih komunikacija na toj osnovi koriste samo s oklijevanjem. Danas se ta tehnika koristi za prijem programa kojeg se inače ne može primiti. Međutim, druge prednosti, kao višestrukost programa, naročita kvaliteta prijema te neki drugi oblici komunikacija, danas su još u pozadini. Za prijenos više televizijskih programa stoji na raspolaganju frekvencijski multipleks u području od 47 do 300 MHz (oko 30 televizijskih kanala). Pri korištenju kanala od 230 do 293 MHz potrebna je transpozicija u decimetarsko područje (470 do 790 Mhz) što može primiti komercijalni prijemnik.

Mogućnost prenošenja poruke suprotno distribucionom smjeru, tj. u smjeru od pretplatnika prema centrali, kabelska televizija stvara preduvjet za ostvarenje dvosmjerne komunikacije za mnoge dodatne službe, kao interaktivno obrazovanje, sve vrsti službi informacija, poziv statičkih slika itd.

To zahtijeva kod pretplatnika niz dodatnih uređaja, što poskupljuje komunikaciju i pretplatniku i centrali.

Protivno komunikaciji teksta i nepokretnih slika treba za prijenos pokretnih slika ostvariti širokopojasne veze, sa širinom pojasa od nekoliko MHz, tj. veze u uspoređenju s audiotelefonskom vezom, oko tisuću puta većom širinom pojasa. Ako se slike kao u kabelskoj televiziji prenose samo u jednom smjeru, dovoljna je širokopojasna distribuciona mreža. Ako se želi pretplatnički individualni dijalog, treba širokopojasna posrednička mreža. Video telefon omogućuje optičku i akustičku komunikaciju, ali zahtijeva širokopojasnu mrežu i posredovanje.

Već ukratko opisan suvremeni razvoj komunikacija dovodi do predodžbe da svijet postaje manji, da se pruža mogućnost porasta homogenosti kulture, jezika i drugih vidova života. Utjecaj elektrokomunikacija postaje veći nego ikada ranije, koraci napretka su sve brži, i sve više dolazi do izražaja činjenica da neka ostvarenja nastupaju brže nego ih se moglo odmjereno ocijeniti sa svih relevantnih stajališta i znanstveno ih planirati. Pojavljuju se što više i neželjeni efekti. Njih je moguće smanjiti, ali ne i eliminirati, samo uz procjenu koja proizlazi osim iz tehničkog planiranja i iz više društvenih disciplina. Ako izdvojimo samo vizualnu dvosmjernu komunikaciju na daljinu, spektar mogućih informacija koje se velikom količinom i intenzitetom nameću preko granica, do jučer relativno zatvorenog privatnog života, onda se odmah uočava novi kompleksni utjecaj na život pojedinca i grupe. Pozitivnost ili negativnost tog utjecaja nije jednostavno, apriori, saglediva. S tim u vezi se nameće čitav niz pitanja, na koja tehnika ne daje odgovor, jer se do jučer nije tim problemima bavila. U društvenom pogledu moguće je djelovanje na životnu orijentaciju, uspostavljanje više razine obrazovanja, formiranje ukusa, promjene navika u slobodnom vremenu i slično. Zasićenje informacijama može pasivizirati duhovnu aktivnost i smanjiti čovjekovu komunikativnost. Time postaje nužno istraživanje suvremenih komunikacija izvan okvira kođirane fizičke veličine u elektromagnetizmu i njenog prijenosa

ili vjerojatnosti novine prema teoriji informacija. Zahtjevi se proširuju na pitanja važnosti informacije, na strukturu jezika, na implicitni sadržaj koji u poruci nije izravno izražen, a koji je u komunikaciji prirodnog jezika prisutan, te čije poznavanje predstavlja preduvjet za rješenje bolje komunikacije čovjeka sa strojem, za rješenje strojnog prevođenja, za pretvaranje govora u pismo i slično. Dijapazon problematike širi se dalje na probleme prava, politike i konačno, ne samo ravnoteže između mogućih tehničkih ostvarenja i odabiranja sadržaja i mjere informacija, nego i ravnoteže s ekonomskom opravdanosti investiranja. Sve bi to trebalo biti istraženo i ocijenjeno prije ulaženja u tehnička ostvarenja, a ukazuje kako se problem genijalnih radiokomunikacionih početaka Nikole Tesle proširuje na široko područje društvenih znanosti. Uz problem suradnje, do jučer odvojenih znanstvenih disciplina, pojavljuje se i problem istraživanja, koje u netehničkom području ne može biti obavljeno u tako zvanom "off line" postupku. Tu nije lako definirati granice problema, treba uključiti ljude kao dijelove ispitnog sistema, uočiti nedefiniranost vremenske konstante te kompleksnost ponovljivosti eksperimenta. Društveni interesi i psihološka osnova treba ocijeniti udio dobra i zla te stupanj povezivanja i zbližavanja ljudi za smanjenje barijera i izolacije za čim se osjeća latentno pomanjkanje. To tim više što postoji razlika između dobra i informacije u tome, što informacija nije napustila ekspedijenta i u stvari postala zajedništvom i ekspedijenta i percipijenta. U tome je veliko značenje komunikacije jer stvara zajedništvo poruke i njenog sadržaja. Iz svega proizlazi da elektrokomunikacije i njihovi novi oblici nisu sami sebi svrhom te da je nužno izvršiti selekciju tih mogućnosti na ono što je društveno korisno i poželjno i ekonomski moguće. Ekonomski aspekt zahtijeva mjeru između adaptacije starog i investicije u novo. Za daljnji razvoj mora tehničko planiranje obuhvatiti društvenu, privrednu i ekonomsku ocjenu i potrebu.

Literatura:

1. CULBERTSON A.F. The role of digital microwave System in world telecommunication, USA
 2. DICSON E.M. Potencial Impacts of the Video Telephone
 3. ENCEL S. Social aspects of Communication
 4. GRESSMANN R. The future of sound and television broadcasting, Brussels
 5. JONES M.V. The Social Impact of interactive Television
 6. KAISE W. Zukünftige Telekommunikation in der Bundesrepublik Deutschland, Ergebnisse der KtK - Beratungen, Nachrichtentechnische Zeitschrift 3/76
 7. KOHN D. Aspects of direct satellite television broadcasting, Germany
 8. LAETT. Radiocommunications in air navigation Switzzgerland
 9. PARKER J.D. Future of marine electronics, communications and navigation, London
 10. ROSE K.GUTMAN J. Impact of Cable Television on Education
 11. SCHWARTZ M. Social Implications of Telecommunication
 12. STEINHARDT K.H. Kabelfernsehversorgung Grosser Gebiete Nachrichtentechnische Zeitschrift 3/76
 13. TEER K. Communication and Telecommunication
 14. UTLAUT W.F. Reviee of important problems in wave propagation affecting future telecommuni- cation systems performance, USA
 15. WHEELON A.D. The future outlook for communication satellite applications, USA
-
- 1,4,7,8,9,14,15 - World telecommunication forum, Technical Symposium 4-8.X.1975
- 2,3,5,10,11,13 - IEEE Transactions on Communications X 1975

Dr Slavko Svirčević, dipl.ing.
Tvornica telekomunikacionih uređaja
"Nikola Tesla", Zagreb

UDIO TVORNICE TELEKOMUNIKACIONIH UREĐAJA "NIKOLA TESLA"
U RAZVOJU TELEKOMUNIKACIJA U SFRJ

U današnjem organiziranom društvu nezamislivo je odvijanje privredne, administrativne i društvene djelatnosti bez dobro organizirane telekomunikacione mreže. Telegrafija i telefonija kao najstarije grane telekomunikacija razvijale su se kod nas, kao uostalom i svugdje u svijetu, neovisno jedna od druge. tako da su stvorene dvije potpuno neovisne mreže. Tvornica "Nikola Tesla" je jedini isporučilac komutacionih uređaja za telegrafsku mrežu, dok je pretežni isporučilac komutacionih uređaja indirektnog sistema s koordinatnim sklopkama za telefonsku. U zadnje vrijeme se radi na osvajanju serijske proizvodnje uređaja za višestruko korištenje veza za žični i bežični prijenos.

THE CONTRIBUTION OF THE "NIKOLA TESLA" TELECOMMUNICATION
EQUIPMENT FACTORY TO THE DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATIONS
IN YUGOSLAVIA

In present-day organized society it is hardly possible to imagine a normal course of economic, administrative and social activities without a well-organized telecommunications network. In Yugoslavia, as almost everywhere in the world telegraphy and telephony, the oldest branches of telecommunications, have developed independently of each other, thus resulting in two completely independent networks. The "Nikola Tesla" factory is the only supplier of switching equipment for the telegraph network and the main supplier of common control system switching equipment with crossbar switches for the telephone network. The latest efforts are focussed on introducing mass manufacture of equipment for multiplex usage of cable and wireless transmission connections.

U današnjem organiziranom društvu nezamislivo je odvijanje proizvodne, administrativne i društvene djelatnosti bez dobro organizirane telekomunikacione mreže kao medija za prijenos vijesti, informacija i poruka. Baveći se problemima bežičnog prijenosa informacija i energije genijalni Nikola Tesla je već krajem prošlog vijeka uočio značenje brzog prijenosa informacija na daljinu i sa humanitarnog stanovišta tako da je imao ideju da izgradi "Svjetsku stanicu za bežičnu telegrafiju i radiodifuziju". Jedna od najbitnijih karakteristika Nikole Tesle kao pronalazača je i ta da je on mogao jasno sagledati sve posljedice koje će izazvati njegovi pronalasci, što se vidi i iz ove ideje o omogućavanju prenošenja vijesti, informacija i poruka u svaki kutak zemljine kugle.

Koliko se zna, Tesla je jednom prilikom, i to 1881. i 1882.god. u Budimpešti radio prvo na telegrafskoj komutaciji (manuelnoj centrali), a zatim sudjelovao u izgradnji nove telefonske komutacije (manuelne centrale), postao njen upravnik i već tada došao do prvog nepatentiranog pronalaska, o čemu on sam kaže: "Ostvario sam nekoliko poboljšanja na aparatima telefonske centrale i usavršio sam jedno telefonsko pojačalo (mikrofonске struje), koje nikad nije patentirano ili javno objavljeno, ali bih se njime mogao pohvaliti čak i danas".

Ovaj kratki uvod pokazuje da se Nikola Tesla bavio čak i u najužem smislu onim uređajima, istina manuelnim, koje proizvodi naša tvornica, nosilac imena ovog genijalnog pronalazača.

S pravom se može reći da se naša tvornica, koja se poslije oslobođenja razvila iz PTT radionice, razvijala usporedo s razvojem naše nacionalne telekomunikacione mreže. Telegrafija i telefonija kao najstarije grane telekomunikacije razvijale su se kod nas, kao uostalom i svugdje u svijetu, nezavisno jedna od druge, tako da su stvorene dvije potpuno nezavisne mreže, te odvojeno treba govoriti o udjelu tvornice "Nikola Tesla" u razvoju i jedne i druge mreže.

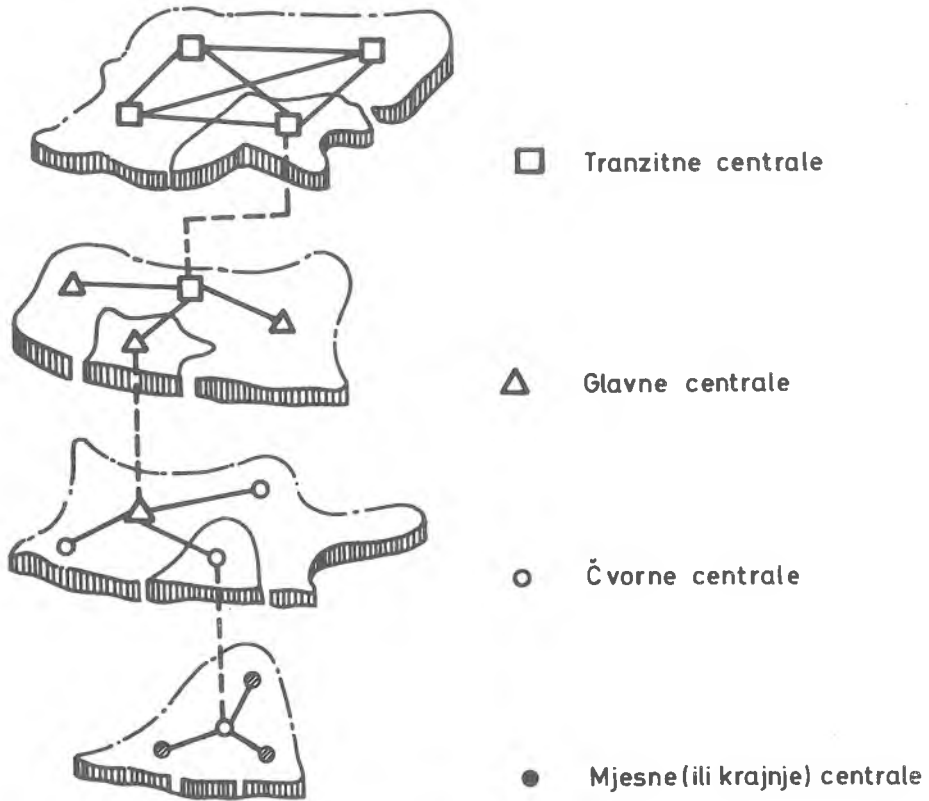
Poslije oslobođenja samo su u našim najvećim gradovima postojale automatske lokalne telefonske komutacije direktnog sistema "korak po korak" proizvodnje njemačke firme Siemens, dok je jedina automatska međumjesna veza bila Herceg Novi - Zelenika,

zapravo Siemensov ispitni poligon za uređaj za automatsko tarifiranje međumjesnih razgovora, tzv. vremensko-zonski brojač. Na osnovu reparacija Mađarska je isporučila opremu za tri komutacije tipa 7DU i započela montažu, a kako su se u međuvremenu zbili događaji oko Informbiroa, montažu su morali, pod vrlo teškim okolnostima, završiti stručnjaci našeg PTT-a.

Veliki kvalitativni skok u razvoju telefonske mreže je načinjen kada je tadašnja Generalna direkcija PTT-a odabrala indirektni sistem komutacija s koordinatnim sklopkama švedske firme L.M. Ericsson za izgradnju komutacionih čvorišta (sl.1). Naša tvornica je 1953.god. sklopila licencni ugovor i stekla pravo na proizvodnju tih tipova komutacije. Prva lokalna komutacija za 1000 priključaka tipa ARF 50, koju je isporučila firma LM Ericsson, montirana je u Zagrebu 1955.god., a prva komutacija naše proizvodnje u Nikšiću 1956. Već taj podatak, da smo uspjeli u tako kratkom vremenu da osvojimo proizvodnju koordinatne sklopke i releja kao osnovnih elemenata komutacije bez dovoljno iskustva u toj tehnologiji, značio je veliki uspjeh. Za relativno kratko vrijeme, uz izuzetak nekih dijelova, proizvodnja kojih nije bila ekonomski opravdana, proizvodili smo, montirali, ispitivali i puštali u pogon komutacije spomenutog tipa, tako da do 31.12. 1975. u 38 mjesta ima u radu 300.000 priključaka.

Da bi se mogle pokriti potrebe za rangove čvornih i krajnjih komutacija, krajem pedesetih godina je započela proizvodnja familije tipova komutacije ARK 30 i to ARK 335 za čvorne, a ARK 315, 314 i 312 za krajnje komutacije. Kasnije je u tvornici razvijen mali tip za krajnje komutacije do 20 priključaka. Do danas je proizvedeno, montirano i pušteno u rad ukupno oko 140.000 mjesnih priključaka s odgovarajućim brojem priključaka za međumjesne vodove, i to u 475 mjesta u našoj zemlji.

Prekretnica u razvoju telefonske mreže nastaje 1964.god. kada se započinje automatizacijom međumjesne mreže, i to na nivou tranzitnih komutacija, uvođenjem mrežno-grupnih stupnjeva (tranzitnih) ARM 201/2 i ARM 50. Ovi mrežno-grupni stupnjevi postavljeni su u 16 od 17 tranzitnih komutacija koliko ih ima u našoj telefonskoj mreži. Kako se mreža razvijala, a potrebe rasle, ovi mrežno grupni stupnjevi pomicali su se prema nižim ravninama,



tj. za formiranje glavnih komutacija mrežnih grupa i većih čvornih komutacija. Do sada su u eksploataciji u 50 mjesta, i to kapaciteta oko 53000 priključnih točaka. (Jednoj priključnoj točki odgovara 5 pretplatničkih priključaka).

Dosta se rano došlo do spoznaje da usvajanje proizvodne tehnologije ne znači i osamostaljivanje tvornice i afirmiranje kao pravog proizvođača, jer je izgradnja mreže veoma dinamičan proces koji uzrokuje stalne promjene, nove zahtjeve eksploatacije radi poboljšanja usluga, nacionalne specifičnosti i sl., tako da se bez sistemskog promatranja mreže, jedan dio koje su komutacioni uređaji, može samo ostati na jednom nivou proizvodnje bez neophodne modernizacije komutacija koje se proizvode. Zbog toga je, još prije zaključenja spomenute licence, osnovana grupa koja je studirala i radila na vlastitom razvoju komutacija s koordinatnim sklopkama i koja je do današnjeg dana prerasla u institut s oko 240 inženjera. Ovi stručnjaci rade na razvojnim poslovima telefonije, telegrafije, prijenosa podataka, uređaja za višestruko korišćenje veza i radio relejne te signalne tehnike kako za potrebe u zemlji tako i za izvoz, koji predstavlja 30-40% naše cjelokupne proizvodnje.

Prateći moderne trendove razvoja telefonskih mreža, tvornica je početkom sedamdesetih godina mogla ponuditi novu generaciju komutacija za sve nivoe u mreži. Osnovna odlika ovih komutacija je ta da pružaju viši nivo usluga pretplatnicima. Zahvaljujući registarskoj multifrekventnoj signalizaciji, veze se brže uspostavljaju, nadzor i održavanje su koncipirani na najmodernijim principima i veoma su prilagodljive za primjenu u mrežama s raznim vrstama signalizacije.

Za srednje i velike lokalne kapacitete to je tip komutacije ARF 102 koji nadomještava ARF 50, za krajnje komutacije ARK 50 umjesto ARK 30, za čvorne kombinacije ARK 50 ili ARF 102 sa mrežno grupnim stupnjevima ARM 50 i ARM 201/4 prilagođenim za rad s registarskom multifrekventnom signalizacijom i za konverziju raznih vrsta drugih signalizacija. Već danas ima u eksploataciji u 429 mjesta 115600 priključaka ARF 102, a ARM 50 i ARM 201/4 6600 priključnih točaka, dok je u montaži još oko 21.000.

Jedna od najvažnijih odlika tipova lokalnih komutacija,

kako ARF 102 tako i ARF 50 te mrežno grupnog stupnja ARM 201/4 i 201/2, je ta da se u eksploataciji dalje mogu modernizirati uvođenjem procesora umjesto registara i analizatora. Na taj način se postiže nivo usluga koje danas mogu pružiti novokonstruirane, procesorski upravljanje komutacije, a da se procesori uvedu tek onda kada se za to ukaže stvarna potreba, tj. kada je to ekonomično. Na gore opisani način koncipirane procesorski upravljane komutacije, pod nazivom ARE 11 za lokalne komutacije i ARE 13 za mrežno grupne stupnjeve, pripremaju se za serijsku proizvodnju.

S obzirom da je naša tvornica u toku desetogodišnjeg perioda do danas bila jedini isporučilac komutacione opreme za telegrafsku mrežu, morala je tim prije osjetiti obavezu da pokrije sve rangove komutacija u mreži od krajnjih preko čvornih do tranzitnih. Kao krajnje i lokalne telegrafске komutacije proizvodi se tip ACT-K60/B (ARB 111) s koordinatnim sklopkama u komutacionom polju i markerskim upravljanjem, kojih do sada ima u 42 mjesta sa 7700 lokalnih priključaka. Za čvorne komutacije se koristi kombinacija spomenutih krajnjih i mrežno grupnog stupnja ARM 50 koji se osim u registrima veoma malo razlikuje od onog, već spomenutog, kod telefonske mreže. U rangu tranzitnih komutacija u eksploataciji se nalazi kombinacija krajnjih i mrežno grupnog stupnja ARM 201/2, za koju vrijedi isto što je rečeno i za ARM 50. I jednog i drugog tipa mrežno grupnog stupnja ima u 13 mjesta s oko 6900 priključnih točaka.

Zajedno s komisijom Zajednice JPTT naši stručnjaci rade na koncepciji modernizacije telegrafске mreže za javni saobraćaj, koja bi obuhvatila i prijenos podataka raznim brzinama kao i na mreži za pretplatnički saobraćaj.

U najnovije vrijeme, nakon sporazumnog prelaska grupe stručnjaka iz tvornice RIZ, tvornica "Nikola Tesla" se pojavljuje i kao proizvođač uređaja za višestruko korišćenje veza kako na bazi frekventne tako i na bazi digitalne (PCM) modulacije. Ulaženje u ovu proizvodnju ima dvojaki razlog. S jedne strane da se eksploataciji može ponuditi kompletnija oprema za izgradnju mreže, dakle i komutaciona i prenosna, a s druge strane što digitalna, pulsno kodna tehnika predstavlja osnovu za digitalne komutacije, tj. komutacije s vremenskom podjelom kanala, što u svijetu predstavlja, uz procesorsko upravljanje, trend razvoja komutacionih uređaja.

Uviđajući dosta rano prednost digitalnih telekomunikacija, naša tvornica je u periodu od 1972.-1975. radila zajedno sa Zavodom za telekomunikacije ETF Zagreb, razvojnim sektorom poduzeća PTT saobraćaja Zagreb kao i drugim eksploatacionim organizacijama na projektu: "Kompleksna istraživanja na području integriranih digitalnih sistema veza" uz sufinansiranje Fonda za naučni rad SRH. Za period od 1976.-1980.god. predložen je SIZ-u I projekt: "Istraživanja na području etapne realizacije integrirane telekomunikacijske mreže kao osnove informacionih sistema" u zajednici s naprijed spomenutim ustanovama i organizacijama uz napomenu da je taj projekt predložen i kao međurepublički. Upravo zato što vrlo pažljivo pratimo razvoj komutacija u svijetu, naši planovi razvoja predviđaju uvođenje u mrežu SFRJ do 1980.god. novog tipa komutacija sa slijedećim bitnim karakteristikama: centraliziranim upravljanjem komutacija, tokovima prometa i održavanjem, zatim, digitalno prospajanje, modularnost softvera i hardvera, upravljanje udaljenim pretplatničkim stupnjevima, primjenjivost istih centralnih procesorskih jedinica kako u telefoniji tako i telegrafiji i prijenosu podataka, kao i sve ostale mogućnosti za pretplatnike i PTT poduzeća. Mi se nadamo da će takav sistem, s obzirom na relativno jednostavnu daljnju modernizaciju, moći dugo da zadovolji potrebe moderne telekomunikacione mreže.

Učešće naše tvornice u razvoju telekomunikacija u zemlji predstavlja skromni doprinos proslavi 120-godišnjice rođenja velikog naučenjaka Nikole Tesle, koji je veoma rano uočio važnost prijenosa informacija na daljinu.

LITERATURA:

1. Bokšan, S.: Nikola Tesla i njegovo delo
Naučna knjiga, Beograd, 1950.
2. Popović, M.V.: Nikola Tesla
Novinsko izdavačko preduzeće Tehnička knjiga
Beograd, 1967.

Zvonko Vuković, dipl. ing.

Mr. Miroslav Jozić, dipl. ing.

Aleksandar Glišić, dipl. ing.

Tvornica telekomunikacionih uređaja

"Nikola Tesla", Zagreb

TELEKOMUNIKACIONI SISTEM ZA PRIJENOS PODATAKA MALIM BRZINAMA

U referatu je opisan komutacioni sistem velikog kapaciteta za prijenos telegrafskih signala i podataka na bazi komutacije kanala. Opisane su eksploataciono-tehničke karakteristike i njihova realizacija u komutacionom sistemu. Dat je i posebni osvrt na pojedine usluge korisnicima. Opisane su karakteristike i mogućnosti ispitno-mjernog centra za nadzor i održavanje komutacionog čvorišta. Opisana je tehnologija uređaja.

TELECOMMUNICATION SYSTEM FOR LOW RATE DATA TRANSMISSION

The high capacity system for telegraph signal and data switching, described in the paper, is based on the circuit switching principle. The operating and technical characteristics and their implementation within the system are outlined. Particular emphasis is placed upon subscriber facilities. The characteristics and potentials of a test-and-measuring centre for switching system supervision and maintenances are listed, and equipment is described in terms of its technology.

1. KOMUTACIONI SISTEM TELEX/D

Tvornica "Nikola Tesla" razvila je novi tip komutacija TELEX/D za prienos telegrafskih signala kao i podataka brzinom do 200 Bd.

Sistem TELEX/D radi na principu komutacije kanala. Kao komutacioni element služi koordinatna sklopka, koja se u praksi pokazala vrlo kvalitetnim i pouzdanim elementom. Upravljanje je indirektno pomoću markera i registara re-lejskog tipa.

To su uostalom opće karakteristike mnogih sistema druge generacije, no sistem TELEX/D ima neke nove mogućnosti, koje mu omogućuju da uspješno i vrlo ekonomično riješi probleme komutacija velikog kapaciteta.

2. EKSPLOATACIONO-TEHNIČKE KARAKTERISTIKE

2.1. Integracija službi

Jedna od osnovnih novih karakteristika sistema TELEX/D je integracija službi:

- javne službe telegrama
- javne pretplatničke telegrafske mreže
- javne mreže za prienos podataka 50 i 100 Bd
- javne mreže za prienos podataka 100 i 200 Bd

Sistem mora razlikovati pripadnost poziva jednoj od spomenutih službi na temelju indeksa, tj. jedne posebne znamenke, različite za svaku službu. Taj indeks se u sistemu TELEX/D generira automatski i osim četiri spomenute službe predviđeno je još šest rezervnih indeksa.

2.2. Identična numeracija za razne službe

Svaka od nabrojenih službi formira mrežu sa svojom vlastitom numeracijom. Pri usmjeravanju se koristi indeks (pripadnost službi), no osim toga je potrebno provesti i preračunavanje pozivnog 6-znamenkastog broja u broj koji odgovara željenoj priključnoj točki.

2.3. Galvansko prospajanje

U transmisionom traktu, tj. od ulaza do izlaza iz komutacije, nema retranslacionih telegrafskih releja. Ova karakteristika osigurava transparentciju komutacionog polja na kod i brzinu, te na način sinhronizacije (asinhroni i sinhroni način). Transparentno komutaciono polje ovog tipa omogućuje rad većim brzinama telegrafiranja bez dodatnog izobličenja. Spomenuta karakteristika je stvorila potrebu da se strogo definiraju uvjeti na ulazu i izlazu iz komutacije. Tako su definirani naponi, struje i unutrašnji otpori za prijemne i predajne krugove i usvojen je princip da se sve linije korisnika i spojni vodovi priključuju četverožično za rad dvolikom strujom.

2.4. Kontrola držanja i raskidanja veze

U vezi s ~~prijenosom~~ podataka do 200 Bd realizirani su vrlo oštri zahtjevi za držanje i raskidanje veze. Sklopovi za kontrolu držanja i raskidanja veze moraju osim toga automatski odabrati odgovarajuću vremensku kontrolu ovisno o tome da li se radi s 50 Bd ili sa 100/200 Bd kod prijenosa podataka. Da bi se zadovoljio taj zahtjev, bez utjecaja na prijenos korisnih informacija, razvijeni su elektronički sklopovi koji kontroliraju signalne žile u toku veze.

2.5. Usluge za korisnike

Sistem TELEX/D nudi niz usluga za korisnike, od kojih ćemo ovdje spomenuti samo neke:

* Direktan poziv (hot-line)

Za neke korisnike ostvarena je mogućnost uspostavljanja veze bez biranja, ali uvijek prema jednom istom odredištu. Dovoljno je da takav korisnik, koji se markira posebnom kategorijom, inicira poziv, a nakon toga se veza uspostavlja automatski.

* Skraćeno biranje

Odredjena kategorija korisnika ima mogućnost uspostavljanja veze prema odredjenoj grupi korisnika biranjem samo jedne umjesto 6 znamenki.

* Biranje

Komutacija omogućuje korisnicima da biraju brojčanicom (dekadski) ili tastaturom teleprinteru (kodno). Biranje tastaturom je izvedeno s 50 i 100 Bd kodom ITA 2. Postoji mogućnost biranja kodom ITA 5 s 200 Bd.

* Službeni signali

Za kontrolu uspostavljanja veze potrebni su službeni signali (OCC, DER, NA, NP i dr.). Službeni signali moraju se odašiljati s 50 i 100 Bd. Uz službeni signal odašilje se i oznaka vremena.

2.6. Usluge za eksploataciju

Velik dio novih rješenja je posvećen rješavanju eksploatacionih problema. Spomenimo i ovdje samo neke od njih:

* Zaštita od lažnih poziva

Sve linije korisnika i svi spojni vodovi zaštićeni su od lažnih poziva, koji su posljedice smetnji s linije. To je ispunjeno ugradjivanjem odgovarajućih elektroničkih sklopova po svakoj priključnoj točki.

* Blokada linija

- Sve linije korisnika se automatski blokiraju pri kratkom ili dozemnom spoju linije, te u slučaju prekida na liniji. Linija korisnika se automatski blokira i pri izostanku naslovnice kod automatskog traženja naslovnice.
- Spojni vodovi se također automatski blokiraju kod greške na kanalu, a za vrijeme blokade se odašilju tzv. re-test impulsi, koji omogućuju automatsko deblokiranje nakon otklanjanja kvara.

Za javnu službu telegrama od najveće je važnosti da se telegrami dostave adresatu na vrijeme i da nema odbijenih poziva zbog zauzeća i blokade. Ovi su razlozi inicirali nekoliko interesantnih rješenja.

* Prijem pretičnog dolaznog i tranzitnog saobraćaja

Pozivi javne službe telegrama, koji naidju na zauzeće ili blokadu, preusmjeravaju se automatski na odgovarajuća radna mjesta, a odavde se odašilju uz pomoć specijalnih manuelnih stolova direktnim prospajanjem na liniju korisnika bez automatske komutacije.

* Prioritetni pozivi

- Komutacija razlikuje specijalno markiranje poziva koji pripadaju javnoj službi telegrama. Ovi se pozivi normalno prospajaju ako se veza može automatski prospojiti. Ako takav poziv naidje na blokadu ili zauzeće, automatski se prebacuje na specijalno radno mjesto. Operator na tom radnom mjestu može uspostaviti prioritetan poziv direktnim ulaženjem u liniju korisnika ili spojni vod i pri tom može prekinuti neku neprioritetnu uspostavljenu vezu. Operator ima mogućnost razlikovanja prioritetnih i običnih poziva.

- Osim ovog manuelnog prioriteta, realiziran je i automatski uređaj za prospajanje prioriternih poziva na spojne vodove, koji nema mogućnost prekidanja postojećih poziva.

* Prospajanje cirkularnih poziva

Za javnu službu telegrama razvijen je uređaj za prospajanje cirkularnih telegrama. Ovaj uređaj je predviđen za odašiljanje telegrama iz komutacionog centra istovremeno prema 100 unaprijed odredjenih korisnika.

Odabiranje korisnika je jednostavno pomoću tipaka.

* Prebacivanje poziva prema vremenskom programu

Jedno od najzanimljivijih, ali istovremeno i najstroženijih rješenja je prebacivanje poziva za javnu službu telegrama. Na širem gradskom području ima više PTT odjeljenja od kojih neka nemaju organiziranu danonoćnu dostavu telegrama. To se odnosi na vrijeme izvan njihovog radnog vremena ili u dane praznika. Dolazni pozivi za odjeljenja koja ne rade, automatski se prebacuju na ona odjeljenja koja imaju organiziranu danonoćnu dostavu telegrama.

Uređaj koji je razvijen upravo za takvo vremensko programiranje prebacivanja dolaznih poziva ima mogućnost odabiranja više različitih vremenskih programa u zavisnosti o radnim danima u tjednu, neradnim danima i praznicima. Uređaj je razvijen u elektroničkoj tehnici i ima još neke funkcije:

- ručno i automatsko odabiranje vremenskih programa
- ispitivanje grupnih priključaka (PBX)
- preračunavanje pozivnih brojeva u broj priključne točke komutacionog polja

3. KARAKTERISTIKE ISPITNO-MJERNOG CENTRA

Konstruktivna izvedba sistema TELEX/D i činjenica da je sistem predviđen za velike tranzitne centre, definirali su koncepciju ispitno-mjernog centra (IMC). Osnovne karakteristike IMC su:

- veliki krajnji kapacitet
- velika elastičnost s obzirom na vrlo različite uvjete suradnje tranzitnog centra sa susjednim centralama.

Zadatak je IMC da omogućí:

- nadzor rada cijele centrale
- automatsko ispitivanje parametara centrale i pojedinih njenih organa
- lokalizaciju i dijagnozu greške u bilo kojem dijelu komunikacije
- kontrolu kvalitete saobraćaja kroz centralu
- prognoziranje mogućih smetnji na temelju pada kvalitete saobraćaja
- intervencije preventivnog karaktera.

3.1. Rad cijele centrale nadzire se pomoću različitih uređaja:

- * Na kontrolnom stolu koncentrirane su informacije o svim važnijim greškama (pregaranje osigurača, nestanak napona i sl.). To je tzv. centralni alarmni uređaj.
- * Kontrola kvalitete saobraćaja centralizirana je u uređaju KKS. Kontrolira se odnos broja neuspjelih poziva i ukupni broj poziva. Ako taj odnos premaši neku unaprijed zadanu vrijednost, daje se alarm. Ovom kontrolom su obuhvaćene grupe svih centralnih organa.
- * Nadzor spojnih vodova prema susjednim centralama omogućen je pomoću nekoliko različitih uređaja.

Kontrolira se odnos uspješno ostvarenih poziva prema ukupnom broju poziva u nekom smjeru. Ako je izmjereni odnos manji od unaprijed zadanog, daje se alarm.

- * Mjeri se vrijeme totalnog zauzeća nekog smjera u odnosu na period mjerenja (npr. 1 sat). Ako suma vremena totalnog zauzeća predje neku unaprijed zadanu vrijednost (do 14%), daje se alarm.

3.2. Za mjerenje i ispitivanje dijelova centrale razradjeni su odgovarajući uređaji:

- * Uređaj za ispitivanje magistralnih kanala (spojnih vodova) omogućuje lokalizaciju greške i automatsku rutinsku kontrolu signalizacije te mjerenje izobličenja na spojnim vodovima.
- * Uređaj za mjerenje saobraćaja na pretplatničkim linijama omogućuje mjerenje individualnih i grupnih priključaka.
- * Uređaj za ispitivanje prenosnika je mobilni uređaj, koji je namijenjen ispitivanju i održavanju centrale. Koristi se za ispitivanje svih kriterija signalizacije, prospajanja, tarifiranja i rada sa susjednim centralama.
- * Uređaj za ispitivanje registara je mobilni uređaj namijenjen ispitivanju grupe registara po određenom rutinskom programu i detaljnom ispitivanju pojedinih registara.

4. TEHNOLOGIJA UREĐAJA

Svi sklopovi za kontrolu stanja signalnog puta, generatori impulsa i serija impulsa, ponavljajući elementi i sklopovi za kontrolu držanja veze, izvedeni su elektroničkim elementima.

Generator telegrafskih signala, generator impulsa, prijemnik telegrafskog koda i uređaj za preusmjeravanje prometa izvedeni su integriranim krugovima tipa HLL.

U sistemu je, nakon provedene optimizacije asortimana sklopova, realizirano 200 tipova elektroničkih sklopova.

Stalci i slogovi (shelf) realizirani su u vlastitoj izvedbi tvornice nakon provedenih mehaničkih i električkih ispitivanja. Izvedba stalaka i slogova je uskladjena s postojećim izvedbama stalaka i slogova u komutaciji s koordinatnim sklopkama.

5. POUZDANOST UREDJAJA I ČVORA

Osnova za projekt pouzdanosti bila je pouzdanost koordinatnog komutacionog polja i većine upravljačkih organa komutacije za prijenos podataka. Prilikom projektiranja pouzdanosti sistema u toku razrade koncepcije sistema, a djelomično u toku konstrukcije i laboratorijskog ispitivanja, postavljen je zahtjev da svi uređaji u novoj tehnologiji moraju biti pouzdani kao systemska osnova.

Sklopovi i uređaji izvedeni su s elektroničkim komponentama, koje su umjetno ostarene (burn-in).

Prilikom projektiranja pouzdanosti centralnih uređaja udvojeni su vitalni sklopovi.

Prije verifikacije uređaja, svi sklopovi ispitani su u veoma oštrim električkim i klimatskim uslovima, a zatim podvignuti dužem neprekidnom radu.

6. RADNA GRUPA ZA RAZVOJ, ISPITIVANJE I REALIZACIJU UREDJAJA ZA INDUSTRIJSKU PROIZVODNJU

Razvoj sistema prošao je kroz nekoliko faza. U prvoj fazi utvrđeni su tehnički zahtjevi s kupcem. Nakon definiranja

tehničkih zahtjeva počeo je u drugoj fazi rad na detaljnoj koncepciji sistema i utvrđivanju specifikacije sistema. Po završetku specifikacije sistema, u trećoj fazi realizacije, grupa inženjera i tehničara konstruirala je, izradila i ispitala maketne primjerke uređaja i sklopova. U četvrtoj fazi razradjeni su tehnološki postupci i dokumentacija potrebna za proizvodnju. Izradjeni su prototipni primjerci i ispitani u finalnoj funkcionalnoj kontroli. Ovu fazu radila je grupa inženjera, tehničara i kvalificiranih radnika. Nakon verificiranja prototipa i proizvodne dokumentacije, sistem je predan u proizvodnju.

Na razvoj sistema utrošeno je oko 300 ljudi godina rada.

LITERATURA

1. Močinić Z., Regvart V.:

Ispitno mjerni centar za telegrafske centrale sistema D
(Časopis Elektrotehnika, Zagreb - Godište XVIII - 1975.
br. 5 str. 315-323)

2. Vuković Z., Jozić M., Glišić A.:

Telegrafska centrala za korisnike sa složenim zahtjevima
tipa ACT-K60/D i MMC-K57 telex/D
(Referat na VIII jugoslavenskom simpoziju o telekomunikacijama - Ljubljana, 1974 god.)

Prof.dr Branka Zovko-Cihlar
Elektrotehnički fakultet
Zavod za visokofrekventnu tehniku
Zagreb

PRIMJENA NOVE TEHNOLOGIJE U FREKVENTNO OVISNIM SKLOPOVIMA RADIO- RELEJNIM SUSTAVA

Razvoj nove suvremene trakaste tehnologije i njena primjena u oscilatorima, pojačalima snage, umnoživačima frekvencija i sklopovima za odgranjivanje osigurali su visok stupanj stabilnosti izlazne snage, jednostavnu promjenu frekvencije, nepotrebno naknadno podešavanje i ograničavanje broja rezervnih dijelova.

U referatu je dana usporedba između valovodne i trakaste tehnike, način provođenja proračuna komponenata i sklopovska rješenja.

STRIP-LINE TECHNOLOGY IN FREQUENCY DEPENDING RADIO LINK CIRCUITS

The development of modern strip-line technology and its application to oscillators, power amplifiers, frequency multiplier and branching equipment insures a high degree of stability in output power, additional frequency adjustment and reduces spare part consumption.

The difference between waveguide and strip-line technology, and component and circuit design are discussed.

1. Uvod

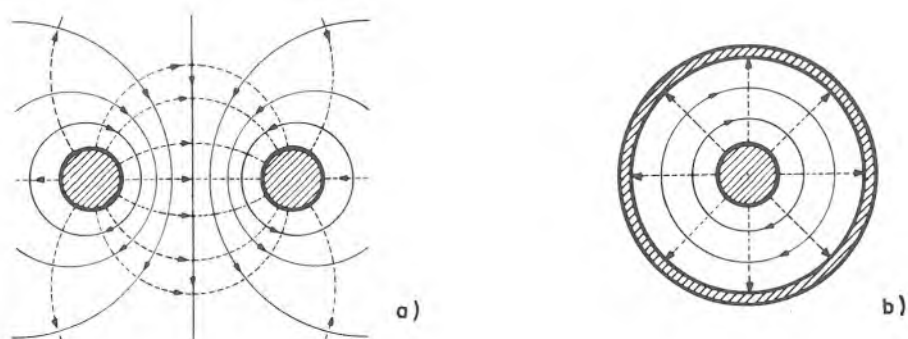
Suvremeni razvoj radiokomunikacija uzrokovan sve većim potrebama prijenosa velikog broja informacija, uvjetovan je u osnovi razvojem tehnologije. Tehnološka rješenja u vidu trakaste tehnike pružaju izvanredne mogućnosti u pogledu efikasnosti, ekonomičnosti i pouzdanosti. Posebno treba istaknuti utjecaj

tehnoloških dostignuća na polju radiorelejnih veza kako zemaljskih tako i satelitskih. Naime, satelitska ostvarenja postavila su nove dodatne zahtjeve kvaliteti i pouzdanosti uređaja, na koje je dala odgovor suvremena tehnologija.

Pri proizvodnji elektroničkih komponenata osjeća se opća tendencija minijaturizacije komponenata uvođenjem novih materijala i proizvodnih postupaka, što obećava bitno smanjenje volumena uz poboljšanje kvalitete karakteristika. Naročiti tehnološki napredak opaža se u ovom tehničkom rješenju pasivnih komponenata - u trakastoj tehnici za frekventno područje od nekoliko stotina MHz do nekoliko desetaka GHz. Važno je napomenuti da se, osim malenog volumena, sklopovi izvedeni u trakastoj tehnici, odlikuju velikim serijama, širokim frekventnim područjem i niskim troškovima proizvodnje.

2. Širenje elektromagnetskog vala

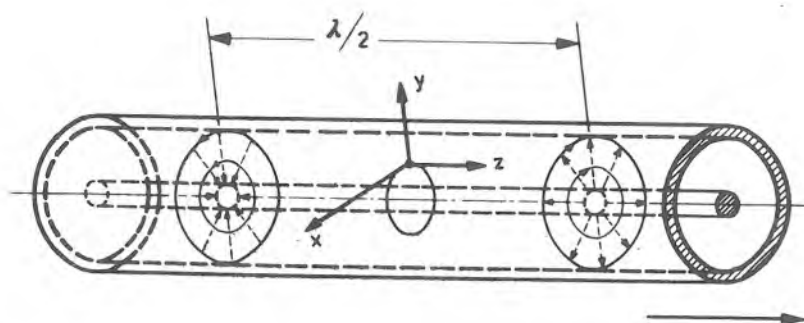
Pri širenju elektromagnetske energije duž prenosne linije, napon i struja koji se dovode na tu liniju, stvaraju električko i magnetsko polje, kako pokazuje slika 1. Silnice električkog i magnetskog polja putuju u smjeru širenja kao elektromagnetski val. Komponente električkog i magnetskog polja imaju koordinate x , y i z kako je i vidljivo na slici 2, i u funkciji su radne frekvencije. Dakle, elektromagnetska zbivanja odvijaju se u trodimenzionalnom prostoru, i kvantitativna analiza stanja daje kao općenito rješenje diferencijalne jednačbe, koje to stanje adekvatno tumače, kao opće rješenje stojni val, tj. refleksiju. Stanje bez refleksije odgovara specijalnom slučaju beskonačne dimenzije ili prilagođenju.



----- silnice električkog polja
 ————— silnice magnetskog polja

Slika 1 Električko i magnetsko polje a) u slučaju dvožične prenosne linije b) u slučaju koaksijalne prenosne linije.

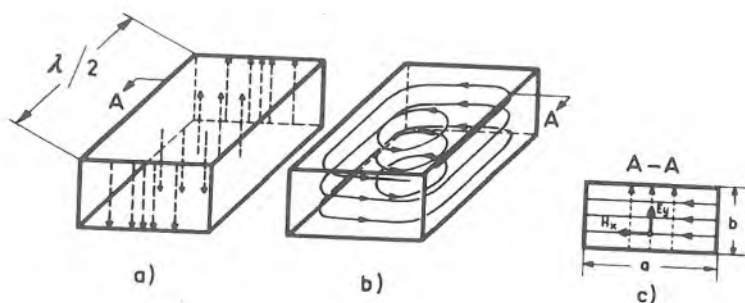
U području mikrovalnih sklopova za prijenos elektromagnetske energije do pred desetak godina isključivo su se koristili valovodi. Valovod je šuplja metalna cijev koja prenaša elektromagnetsku energiju s jednog kraja, gdje se nalazi radiorelejni uređaj, na drugi gdje se nalazi antena ili obrnuto.



----- silnice električkog polja
 ————— silnice magnetskog polja

Slika 2 Širenje elektromagnetskog vala u TEM modu u koaksijalnoj prenosnoj liniji.

Presjek valovoda može biti pravokutni ili kružni. Zidovi valovoda služe za oblikovanje polja i prema tome vode val. Tumačenjem Poyntingovog vektora energija se širi medijem unutar valovoda, a samo manji dio ulazi u zidove i gubi se u vidu topline. Dimenzije valovoda ovise o prenašanoj frekvenciji, pa se smanjenjem frekvencije, povećavaju. U valovodu je moguć veliki broj diskontinuiranih konfiguracija polja ili modova. Različite moguće raspodjele polja za danu geometriju nazivaju se modovi. Modovi širenja elektro magnetske energije odgovaraju rješenjima Maxwellovih jednažbi uz zadovoljenje rubnih uvjeta. Mod, koji ima najveću graničnu duljinu, naziva se dominantni mod. TEM mod je karakteriziran činjenicom da nema komponente



----- silnice električkog polja
 ————— silnice magnetskog polja

Slika 3 Širenje TE moda u pravokutnom valovodu

polja u z smjeru, tj. sastoji se od komponente magnetskog i električkog polja, koje su okomite na smjer širenja. Za svaku udaljenost $\lambda/2$ dviju ekvifaznih točaka uzduž prenosne linije, silnice toka će se promijeniti u suprotnom smjeru. Na slici 3 dano je širenje TE moda u pravokutnom valovodu, koji nastaje ako je val polariziran okomito na ravninu incidencije. Zahtjevi, koji se postavljaju na valovod, traže da on mora biti homogen kako bi se izbjegli gubici i intermodulacija. TM mod nema z komponentu magnetskog polja, ali postoji E_z komponenta električkog polja.

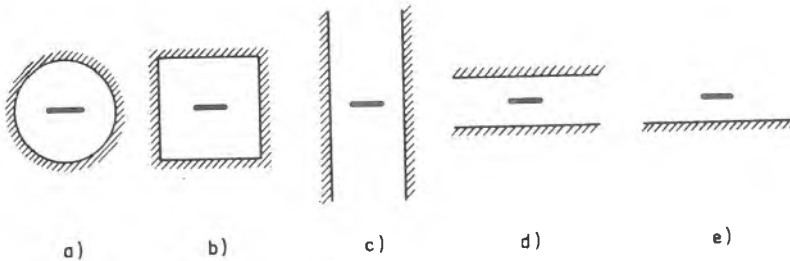
TE mod nema z komponentu električkog polja, ali zato postoji H_z komponenta magnetskog toka. Za pravokutni valovod odnos valne duljine i dimenzija valovoda povezuje izraz za dominantni TE mod

$$= 2 a,$$

gdje je a širina valovoda, i taj se mod najčešće koristi.

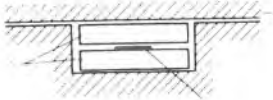
3. Komponente u trakastoj tehnici

Danas se izvode mikrovalne komponente uglavnom u novoj tehnologiji - trakastoj tehnici. Nazivaju se i planarne prenosne linije, a sastoje se od dvije vodljive linije, od kojih je centralni vodič traka određene debljine, dok je vanjski vodič raznih oblika, kako pokazuje slika 4.



Slika 4 Razni oblici planarnih prenosnih linija

Traka se dobije postupkom nagrivanja ili se štampa na razne tipove podloga od dielektričkog materijala. Planarne prenosne linije izvode se u tri oblika, kako je pokazano na slici 5.

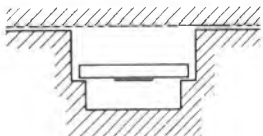


a)

Trakasna linija (stripline)
- traka se nalazi između
dva dielektrika, simetrično
tj. i gornji i donji dio ku-
ćišta je uzemljen.



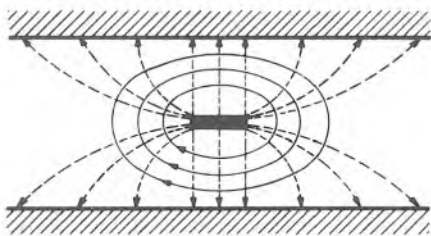
- Mikrostrip linija (microstrip)
- b) - traka je smještena samo na podlozi, nesimetrično i samo je donji dio uzemljen.



- Linija nanescna s donje strane podloge (suspended line) - tra-
- c) ka se postavlja s donje strane podloge i može biti simetrična ili nesimetrična

Slika 5. Izvedbe planarnih prenosnih linija.

Raspored silnica električkog i magnetskog polja u trakastoj tehnici prikazan je na slici 6.



----- silnice električkog polja

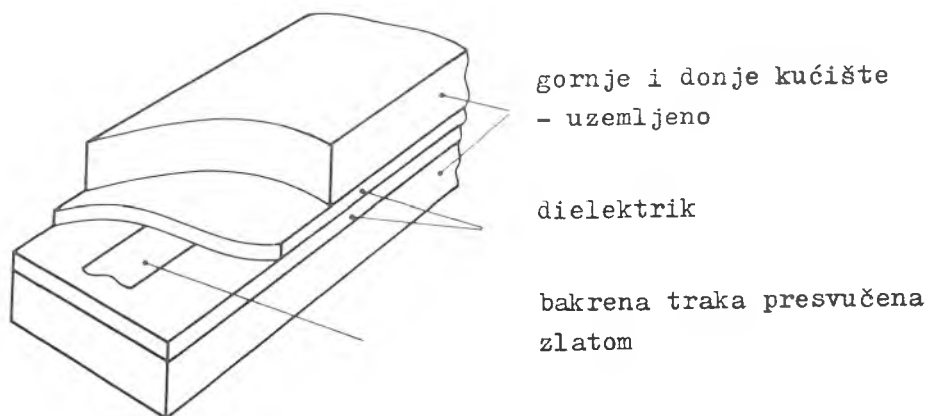
———— silnice magnetskog polja

Slika 6. Električko i magnetsko polje u trakastoj tehnici.

Elektromagnetska energija u trakastoj tehnici širi se TEM modom.

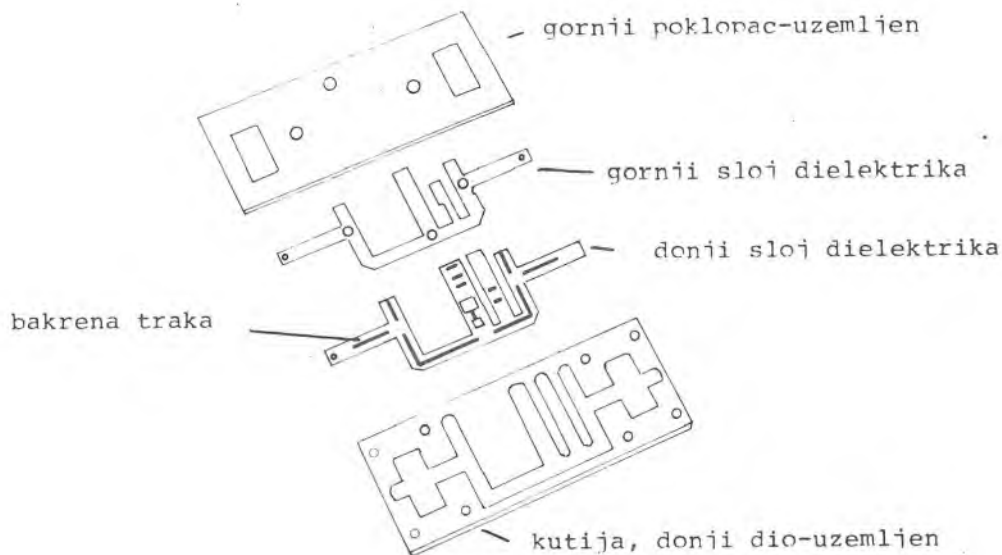
3.1. Tehnologija proizvodnje

Centralni vodič je bakrena traka prevučena tankim slojem zlata i smještena između dva sloja dielektričkog materijala, koji su ograničeni s dvije uzemljene ploče kao vanjskim vodičem, kako pokazuje slika 7. Kutija i poklopac imaju točno određenu udaljenost od centralnog vodiča i ujedno služe kao zaštita od prašine i mehaničkih oštećenja.



Slika 7. Presjek kroz komponentu izrađenu u trakastoj tehnici

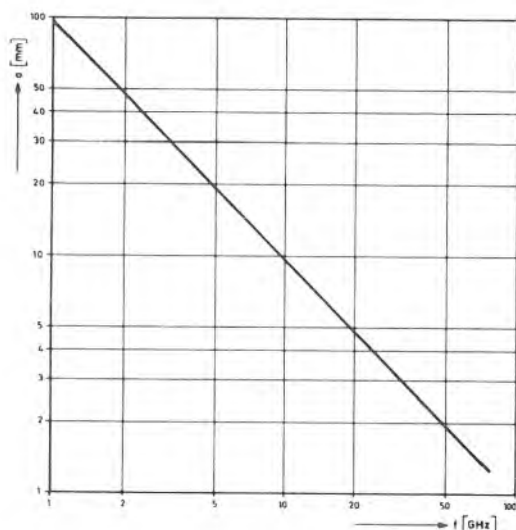
Donji dielektrik ima bakrenu traku - centralni vodič na svojoj gornjoj strani, koja se dobije postupkom nagrivanja, kako je pokazano na slici 8. Tako dobivena putanja električkog kruga ne služi samo kao spoj među komponentama, nego ujedno tvori samu komponentu.



Slika 8. Dijelovi uređaja u trakastoj tehnici prije sastavljanja

Odnos između širine trake i maksimalne frekvencije dan je na diagramu slike 9. Vertikalni zidovi se dobivaju valjanjem

trake u uzemljeno kućište ili lijevanjem uzemljenog bloka zajedno s trakom. Međutim, oba ova postupka su prilično skupa.



Slika 9. Maksimalna širina trake u odnosu na frekvenciju za RT/Duroid dielektrik

3.2. Svojstva dielektrika

Bakreni dio ove izvedbe smješta se na izolacioni materijal. Kod simetričnih izvedbi prostor između centralnog vodiča i gornjeg kućišta mora biti napunjen istim dielektričkim materijalom iste debljine. Kako se širenje elektromagnetskog vala zbiva u dielektriku između centralnog i vanjskog vodiča, važno je znati dielektričku konstantu i gubitke. Ako imamo veću dielektričku konstantu, to ćemo moći postići manje dimenzije. Dužina linija se reducira drugim korijenom iz dielektričke konstante. Često se koristi dielektrik RT/Duroid koji ima kod 7 GHz $\epsilon_r = 2,39$.

Gubici u trakastoj tehnici dijele se na otporne gubitke u traci i uzemljenim kućištima; gubitke u dielektriku i gubitke uslijed zračenja energije.

U mikrovalnim sklopovima veličina je ograničena na izvjestan broj valnih duljina, koji su neovisni o tipu planarne linije ili o odabranom dielektriku.

Gubici su izraženi kao

$$L = \frac{dB}{\lambda_g}$$

gdje je λ_g valna duljina radne frekvencije.

Tako je definiran faktor dobrote neopterećenog kruga kao

$$Q = \frac{27,3}{L}$$

Vidljivo je da je faktor dobrote inverzno proporcionalan s gubicima.

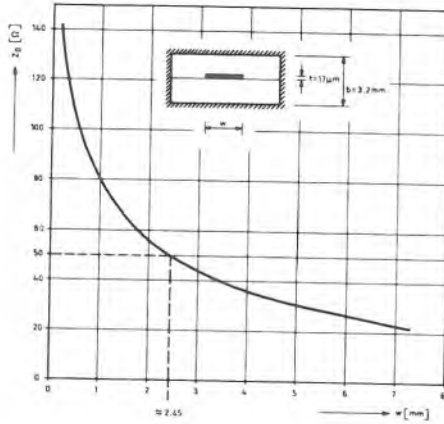
Otporni gubici su neovisni od tipa prenosne linije, ako se ne mijenja debljina podloge, impedancija i dielektrička konstanta. Gubici u dielektriku ovise jedino o faktoru disipacije dielektrika. Tako za RT/Duroid kod 7 GHz faktor disipacije iznosi $7,5 \cdot 10^{-4}$. Gubici uslijed zračenja energije mogu se kontrolirati dimenzijama kruga izvedenog u trakastoj tehnici s obzirom da je električko i magnetsko polje simetrički raspodijeljeno unutar cijelog volumena. Sklopovi su potpuno oklopljeni i svaki dio sklopa je dobro izoliran jedan od drugog. Zbog toga se gubici uslijed zračenja mogu potpuno zanemariti.

3.3. Karakteristične vrijednosti

Karakteristična impedancija Z_0 sklopa, izvedenog u trakastoj tehnologiji, određuje se geometrijom izvedbe, kako je pokazano na slici 10.

Dimenzije trake kao što su debljina t , širina trake W centralnog vodiča i visina razmaka između uzemljenih ploča b određuju karakterističnu impedanciju prema izrazu

$$Z_0 \approx \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r \left(\frac{W}{b} + \frac{C_f'}{0,0885 \epsilon_r} \right)}} [\Omega]$$



Slika 10. Karakteristična impedancija Z_0 kao funkcija širine trake

za vrijednost $w/b > 0,35$. C_f je granični kapacitet, prouzročen debljinom trake t .

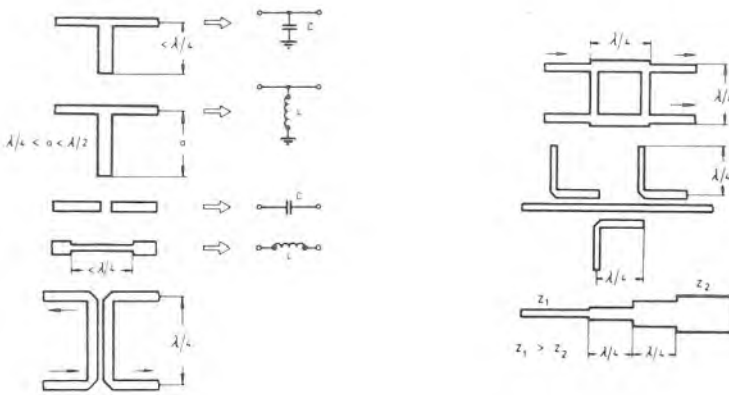
Valna duljina
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Brzina širenja
$$\lambda_v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

gdje su c i λ_0 brzina širenja i valna duljina u vakuumu.

3.4. Izvedba pasivnih komponenata

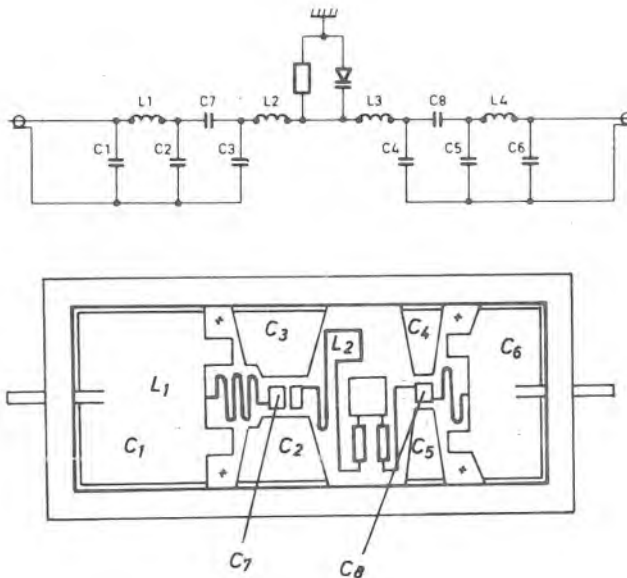
Bakrena traka, presvučena zlatom, služi kao komponenta i kao vodič. U ovoj tehnici, ovisno o vrijednosti same komponente i radnoj frekvenciji, komponente su izvedene na najprikladniji način, kako je prikazano na slici 11.



Slika 11. Izvedba ranih pasivnih komponentata

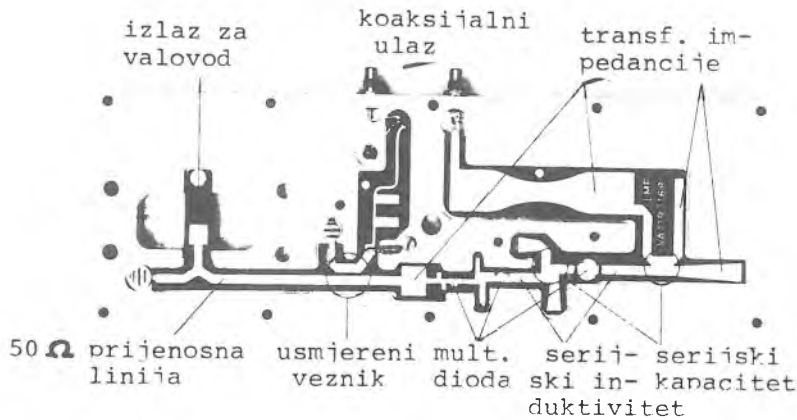
3.5. Izvedba sklopova u trakastoj tehnici

Na slici 12 je dana izvedba umnožača frekvencija prema električkoj shemi i izvedbi u trakastoj tehnici, gdje su još kapaciteti i induktiviteti izvedeni na klasičan način,



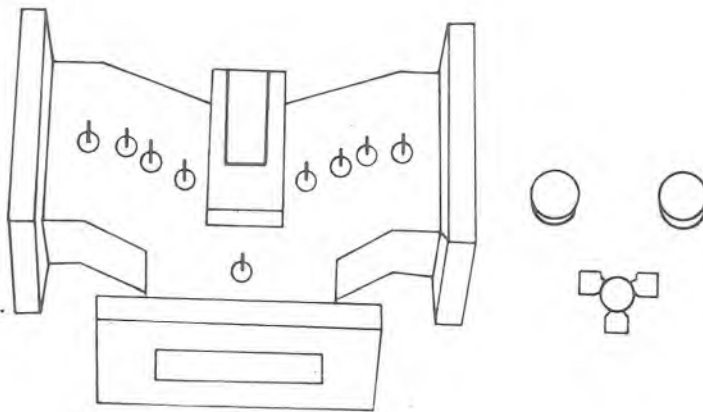
Slika 12. Umnožak frekvencije izveden u trakastoj tehnici na klasičan način

dok je na slici 13. dana izvedba umnožača frekvencije $\times 8$, i to od 1 do 8 GHz. Iz slike je vidljivo da su serijski kapaciteti izvedeni rasporom između dviju linija, a serijski induktiviteti ravnim linijama. To jasno vrijedi za vrlo visoke frekvencije, jer su u tom frekventnom području komponente malih dimenzija.



Slika 13. Umnožač frekvencije $\times 8$, od 1 do 8 GHz izveden u trakastoj tehnici

Izvedba cirkulatora u valovodnoj i trakastoj tehnici prikazana je na slici 14. To su komponente radiorelejnog uređaja u sklopu za odgranjivanje radiofrekventnog dijela.



Kako je vidljivo iz slike, koriste se tablete od permanentnog magnetita i od mekog željeza, koje se polažu ispod i iznad feritne tablete za generiranje magnetskog polja u cirkulatoru.

Slika 14. Prikaz cirkulatora u valovodnoj i trakastoj tehnici.

4. Zaključak

Prednosti izvedbe sklopova u trakastoj tehnici te njihova primjena u radiorelejnim uređajima pri vrlo visokim frekvencijama osnivaju se na činjenicama koje su od bitne važnosti u današnjoj koncepciji suvremenih tehnoloških rješenja.

- Nakon definiranja sklopa u trakastoj tehnici i oblikovanja komponenata sve izvedbe su potpuno jednake.
- Fotokemijski postupak nanošenja trake na podlogu je potpuno automatiziran.
- Vodovi i odvodne komponente su isto izvedene u trakastoj tehnici, te su sve frekventne karakteristike pod kontrolom i neovisne su o proizvodnom procesu. To omogućava proizvodnju radiofrekventnih jedinica u široko frekventnom opsegu.
- S obzirom da su jedinice široko pojasne prenosne karakteristike kao što su gušenje, pojačanje itd. vrlo su stabilne i ne mijenjaju se sa temperaturom i vremenom te nije potrebno provoditi naknadno podešavanje.

Iznesene činjenice povećavaju pouzdanost sklopova u trakastoj tehnici. Međutim, na pouzdanost cijelog uređaja ipak utječu i aktivne komponente, kao tranzistori i diode, koji se mijenjaju s temperaturom i vremenom, što smanjuje pouzdanost cijelog uređaja, a na taj način utječe i na kvalitetu.

LITERATURA

1. Zlatko Smrkić: Mikrovalna elektronika, 1974
2. K. Kurokawa: An Introduction to the Theory of Microwave Circuits, 1969
3. L. Afzelins, : Integrated Strip-line
B.Hagaens, Multiplier Chain
G. Hansson 1971 European Microwave Conference
4. H. Karl: Strip-line Design Technique, 1972