

Želimir Ivanović

Moja priča: od analogne, preko digitalne, učinske do *embedded* elektronike

Sažetak: Moja priča o mojoj profesionalnoj karijeri i pokušaj prikaza kako se moje tehnološko-tehničko okruženje mijenjalo, kroz moj rad, iskušenja, padove, kao jedan osobni inženjerski križni put.

Ključne riječi: Elektrotehnički fakultet, početak inženjerstva, inženjerske mijene, inženjerske krize, nove spoznaje

Uvod

Kad mi je moj rukovoditelj iz vremena rada na Elektrotehničkom institutu *Rade Končar* (ETI), prof. dr. sc. Zvonko Benčić u slučajnom susretu na sadašnjem Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) spomenuo PiFT, objasnio njegov smisao i predložio da ako imam ideju pridonesem tom savjetovanju, priznajem da me malo uplašio, ali i zaintrigirao. Uplašio, jer obično, na kraju se sažima život, učinak i doprinos. Moj profesor likovne umjetnosti J. Depolo rekao je: “Kad dobiješ nagradu za životno djelo, nemaš više dugo do kraja!” I, na žalost, nije živio ni nekoliko mjeseci nakon priznanja za životno djelo. S druge strane, mi inženjeri, aktivni terenci, nepoznati smo, a javnosti ne posebno zanimljivi. Kakva bi to spektakularna priča bila, neki transformatori, pretvarači?

Kad sam razmislio, mislim da bih se usudio, uz tehničku problematiku, napisati i zanimljivu priču u kojoj bih, osim sebe (moje sudjelovanje i iskustvo), ugradio i povijest, i filozofiju, i opći sustav u kojima se fabula dogodila. Nadam se da neću biti pogrešno shvaćen ni previše dosadan. Pokušat ću prikazati svoju karijeru u elektrotehničkoj struci kroz tehničko-tehnološke mijene i mijene softverske podrške. Te su mijene dolazile i prolazile i u području rada i tijekom karijere.

1. priča: Početak

Godine 1971. upisao sam studij na Elektrotehničkom fakultetu (ETF) u Zagrebu. Imao sam osnovnu namjeru postati inženjer. Možda, usprkos ocu, vrlo uspješnom inženjeru građevinarstva. Zvuči neobično, ali ja mislim da je inženjerstvo pokretačka sila civilizacije. Sam naziv *engineer* ima u osnovi pojam ‘pokretanje’. Ali, realizacija radova i financiranje inženjerstva ovisi i o drugim sustavima: politici, modi, trendovima.

Vratit ću se na priču. Godine 1971. dekan ETF-a bio je prof. dr. sc. Vojislav Bego. Svakog je brućuša osobno primio i “prepustio” sustavu studija. Prvo predavanje (velika aula i svi brućuši, oko 700), bilo je iz Osnova elektrotehnike. Enver Šehović, strah i trepet faksa. Ušao je u aulu, kratko šutio, dobio tišinu. Predstavio se i počeo:

“Ja sam Enver Šehović, predajem Osnove elektrotehnike na ETF-u, strah i noćna mora bit ću svima vama. Ako želite biti inženjeri elektrotehnike, morat ćete se sukobiti sa mnom.”

Svi mi “novi” čuli smo zastrašujuće priče prethodnih generacija o padanjima na ispitima i mukama kod tog profesora. Zaista su studentima “zubi škrgutali i suze tekle”.

Onda počne: rad, predavanja, vježbe, labosi, rad-rad, strpljenje-učenje-disciplina. Profesori su bili: matematika – Šparac, fizika – Cindro i Knapp, mehanika – Vučetić, mjerenja – Bego, visokofrekventna tehnika – Smrkić, automatika – Muljević, Kuljača i Husar, poluvodiči – Juzbašić i Crnošija, ONO i DSZ – rezervni kapetan Vučetić, elektronička mjerenja – Šantić i Tonković, telekomunikacije – Matković, industrijska elektronika – Babić i Szabo, digitalna elektronika – Budin, računala neki novi klinici – Lovrek, teoretska elektrotehnika – Bosanac,... a u auli legende: Lopašić, Blanuša, Lončar, Wolf... .

Smjer na kojem sam studirao zvao se Elektronika, usmjerenje Automatika, samo 11 studenata. Diplomski rad pod vodstvom Kuljače *Nelinearni model broda i automatsko vođenje na kursu i otvorenom moru*. Referencija V. Utkyn [1]. Početak *sliding mode control* tehnike. Tad nije bilo GPS-a, nego se brod vodio po upisanoj putnoj ruti broda. Rad je bio realiziran na tri analogna računala i CSMP¹ simulacijskom programu na ETF-ovu IBM-u, drugom najmoćnijem digitalnom stroju uz SRCE² u tadašnjoj državi. Programski paketi Fortran IV, Assembler, Basic, DOS.

¹CSMP (engl. *continuous system modeling program*)

²SRCE, Sveučilišni računski centar

Tadašnja tehnika

Klasična elektrotehnika: sklopnici, motori, releji, magnetska pojačala, elektronske cijevi... Iznenada! Pojava poluvodiča: PN prijelaz, silicij-germanij, MOSFET³, mogućnost upravljanja, dominacija diskretne analogne tehnike, početak digitalne tehnike, integrirani sklopovi (čipovi; operacijska pojačala, logički sklopovi, taktni generator⁴ 555, komparatori), programski jezici ECL⁵, HTL⁶, ...

Poluvodiči su postali “gospodari u elektrotehnici”. Njihove mogućnosti upravljanja, nadzora, regulacije bile su nevjerojatne u odnosu na klasične relejno-sklopne sustave. Svaki sklop i njegove komponente izračunavali su se, kataloški odabirali, ispitivale su se i slagale natiskane pločice tzv. kartice (PCB⁷). E-format tiskane pločice 100 mm × 120 mm, jednoslojne, a kasnije dvoslojne. Upravljanje je zahtijevalo ormar-vanu elektroničkih kartica. U učinkom dijelu počela je dominacija učinskih poluvodiča, dioda umjesto živinih ispravljača. Tiristori, trijaci i tranzistori umjesto sklopnih aparata i releja.

Uređaji su bili podijeljeni na učinski i upravljački dio, na ‘ruke i mozak’. Bili su znatno manjih dimenzija od prethodnih, ali ipak su bili “ormari”. Ali, svaka zahtijevana operacijska funkcija mogla se realizirati: upravljanje motorima, tok energije, kemijski procesi, zaštita...

Najmoćnija poluvodička upravljiva sklopka, tiristor, lako se uklapao impulsom na upravljačku elektrodu (engl. *geit*), ali da se isklopi trebalo mu je struju anode poništiti, za što je bio potreban komutacijski sklop za smanjenje anodne struje na nulu, učinski kratkotrajno jednako moćan kao i glavni tiristor, i neko vrijeme da se “oporavi” i pripremi za sljedeći ciklus rada. To je bio i razlog relativno niskih radnih frekvencija, do 800 Hz, te posljedično, naravno, i buke u radu (u zatvorenim prostorima neugodna).

Bipolarni tranzistor bio je brža poluvodička sklopka, ali tehnološki je bio limitiran na male struje (amperi) i niske napone (100 V). FET⁸ je bio preteča bipolarnih tranzistora, ali učinski je mogao raditi pri znatno nižim energijama. LED⁹ je bio na razini signalizacije (mW). Naslućivalo se mikroračunalo, ali proračunski i simulacijski programi bili su izvođeni na velikim računalima, a programi su unošeni preko bušenih kartica.

³MOSFET (engl. *metal-oxide-semiconductor field effect transistor*), unipolarni tranzistor upravljan naponom

⁴taktni generator (engl. *timer*)

⁵ECL (engl. *extendible computer language, EClectic Language*)

⁶HTL (engl.)

⁷PCB (engl. *printed circuit board*)

⁸FET (engl. *field effect transistor*), tranzistor s učinkom polja

⁹LED (engl. *light emitting diode*), svjetleća dioda

2. priča: Elektrotehnički institut *Rade Končar* (ETI)

Kao stipendist *Rade Končara* odmah sam po završetku studija počeo raditi u Elektrotehničkom institutu *Rade Končar*, u Sektoru za elektroniku i automatsku regulaciju. Najprije u Zavodu za elektroniku, čiji je rukovoditelj bio Miroslav Vučetić, a zatim sam tijekom stažiranja prešao u Zavod za energetske elektroniku, kojim je rukovodio Zvonko Benčić. Ako me sjećanje služi, u Zavodu su radili inženjeri: Ivan Flegar, Antun Lisac, Jandro Šimić, Pero Marinčić, tajnica Gordana Fekeža, te majstor Stjepan Stepan i laborant Darko Krizman u laboratoriju i radionici. Stvarala se industrija energetske elektronike, INEM¹⁰ i INFOS¹¹ pod vodstvom prof. Zlatka Plenkovića, Zvonka Benčića, Miroslava Vučetića, Vladimira Plečka i Predraga Vranića. Dio nas iz Sektora prešao je u te tvornice.

ETI je financiran iz obveznog izdvajanja svih *Končarevih* tvornica i vanjskih usluga (najbolji vanjski poslodavac bila je vojska). Pravilo primanja ETI-jevih suradnika bilo je: godina-trošak iz osiguranih financija, vanjske usluge su se koristile za povišenje kvalitete rada: financiranje opreme područja, nabavu instrumenata, literaturu, odlaske na savjetovanja... A zarada preko toga dijelila se u “prekovremeni rad i umjetnički dojam”, malo dodatnih novčića ali i mogućnost putovanja na razna savjetovanja.

Moj rad u Zavodu za energetske elektroniku

Meni se otvorilo područje upravljačkih sklopova učinske elektronike i uređaja za napajanje malih snaga (istosmjerni pretvarači).

Bipolarni tranzistori postali su ‘zakon’ područja, kratka sklopna vremena, mogućnost radne frekvencije u nečujnom 25 kHz području. Bipolarni tranzistori dosegli su strujna opterećenja od više desetaka ampera i zaporne napone do 1000 V. Mana im je bila veliki iznos struje pobude (engl. *based recurrent*). Naime, faktor forsiranja β , omjer struje kolektora i struje baze u području zasićenja imao je vrijednost od 5 do 10. Stoga su pobudni sklopovi (engl. *driver*) tih tranzistora bili “moćni”, trošili su dosta snage i bili su složeni. Ali, svi tehnički problemi bili su rješivi pa se i tom tehnologijom moglo udovoljiti svim tehničkim zahtjevima. Proporcionalni pobudni stupnjevi sa strujnim transformatorom generirali su struju baze proporcionalnu struji kolektora, a iz pomoćnog napajaa uzimali su samo energiju potrebnu za iniciranje stanja tranzistora (engl. *on-off*). Tako se moglo uštedjeti i optimirati potrošnju pobudnog sklopa.

¹⁰INEM, Industrijska elektronika i mjerna tehnika

¹¹INFOS, Informacijski sustavi

Generiranje upravljanja, ostvarenje modulacije PWM¹², FM¹³, PWFM¹⁴ olakšano je pojavom posebnih integriranih sklopova ASIC¹⁵, te integriranih pobudnih stupnjeva. U zatvorenoj povratnoj regulacijskoj petlji i upravljanju dominiralo je operacijsko pojačalo i komparatori u IC izvedbi (najpopularniji 741). PI regulator bio je zakon regulacije. Magnetske komponente izrađivane su na feritnim jezgrama. Moja prva feritna jezgra bila je jezgra iz RIZ-ova televizora, U.I ferit.

Kondenzatori su također udovoljavali novim zahtjevima, npr. glede du/dt , tgd i efektivne struje I_{RMS} . Tiskane pločice ‘nosile’ su fizički upravljačku elektroniku. Odvod topline postao je vrlo važan faktor, ne samo kao područje sigurnog rada komponenti nego i udovoljavanja zahtjevima za sve manji volumen uređaja.

Pojavio se i učinski V-kanalni MOSFET tvrtke International Rectifier, glavni tvorci: Rudy Severns i Brian Taylor. MOSFET je otvorio put u submegahercno područje radnih frekvencija, a naponsko upravljanje smanjilo je potrošnju i dimenzije pobudnih stupnjeva (pobudni stupanj gotovo bez gubitaka jer je FET naponski upravljiva komponenta). Otvorio se put direktnog pobuđivanja učinjskih sklopki iz upravljačkih sklopova.

Digitalna tehnika, programabilni logički sklopovi (engl. *programmable logic controller* – PLC), počeli su ulaziti u naš prostor analogno-digitalne tehnike. Mikroprocesori su najavljivali “novo doba”. Zamislite, mali čip koji programom možete pretvoriti u bilo koji funkcijski sklop? U to vrijeme, ruku na srce, baš nismo vjerovali u njihovu svemogućnost! Kakav je to virtualni svijet koji ne možeš mjeriti osciloskopom, nego mu vjeruješ putem dijagnostike?

Ne smije se zaboraviti spomenuti da smo gotovo svi sudjelovali u projektu i realizaciji tiristorske lokomotive. Rješenje proizišlo potpuno iz znanja končaravaca. Do te smo lokomotive imali licenciju tvrtke ASEA za diodne lokomotive.

Razvojna politika ETI-ja i Zavoda za energetska elektroniku

Izvršna razvojna politika ETI-ja omogućila je nama suradnicima sudjelovanje na znanstvenim savjetovanjima, pod uvjetom da imamo prihvaćen rad. U to smo vrijeme ravnopravno sudjelovali na skupovima s tvrtkama Siemens, ASEA (kasnije ABB), Philips, Motorola, učili i razmjenjivali iskustva. Bilo je to ‘zlatno doba učenja’.

¹² PWM (engl. *pulse-width modulation*), modulacija širine impulsa

¹³ FM (engl. *frequency modulation*), modulacija frekvencije

¹⁴ PWFM (engl. *pulse with phase modulation*), fazna modulacija širine impulsa

¹⁵ ASIC (engl. *application-specific integrated circuit*), integrirani sklop posebne namjene

Ne mogu ne spomenuti stručnjaka koji je prije mogeg dolaska u ETI otišao u Siemens, Antonija Brajdera. On je bio jedan od poticajnih osnivača energetske elektronike u *Končaru*, a u Siemensu je vodio Odjel za istosmjerna napajanja s oko 400 zaposlenika. Meni je ostavio svoje skupljene članke i rukopise, osnove istosmjernih pretvarača. Drugi velikan iz ETI-ja, Alojzije Slutej, postao je u ABB-u nositelj daljinskog upravljanja kontejnerskim lukama (engl. *remote control*). Iz Osla nadziru šangajsku luku. Svi smo se sretali na spomenutim skupovima i ostali u dobrim osobnim i poslovnim vezama.

Skup energetske elektronike (Treće savjetovanje o energetskej elektronici) u Zagrebu 1978. godine bio je u organizaciji Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti (JAZU) i Tvornice *Rade Končar*. Benčić, broj jedan organizacije, okupio je svjetska imena energetske elektronike [2]. Ne mogu ne spomenuti prof. Dewana iz Kanade.

Automatika

ETI je u automatici imao Zavod za regulaciju i Zavod za sustave. Bili su u samom vrhu područja. Vodeći stručnjaci su bili: Franjo Jović, Mladen Kajari, Ante Magzan, Nedjeljko Perić i Borivoje Rajković. Uz njih sam nastavio kontinuitet učenja automatike. Dominirale su PI, PID kompenzacije povratne veze, kriteriji stabilnosti po Bodeu, Nyquistu, Nicholsonu, počela je i vektorska regulacija, kriteriji stabilnosti po Aleksandru Ljapunovu. Perić je posebno inzistirao na procesnim sustavima. Malo smo zaostajali za Stefanovićem, robotika, beogradska škola, koji je projektirao i izradio prvu umjetnu ruku na svijetu.

Pedagoški rad

Končar je imao svoju školu, Centar za obrazovanje *Rade Končar*, tri srednje tehničke škole i Višu tehničku školu (VTŠ). Namjera Centra bilo je obrazovanje u industrijskoj elektronici i klasičnoj elektrotehnici budućih zaposlenika potrebnih *Končarevim* tvornicama. Tako smo mi vrlo rado i često bili i predavači, asistenti i ostali suradnici u nastavi Centra.

3. priča: Slom *Končara*

Pred kraj 1988. slomila se idila *Končara* i industrije u tadašnjoj državi. Totalni otkazi! Među prvim otpuštenim radnicima bili smo mi iz ETI-ja i III-ja (Inženjering za investicionu izgradnju), tvornica generatora, velikih

transformatora, velikih motora, sklopnih aparata... Osim *Končara* ‘pali’ su Prvomajska, ATM,... To je bio totalni krah industrije.

Ja sam iskoristio svoju reputaciju na VTŠ-u, prešao u stalni radni odnos profesora. Predavao sam energetsku elektroniku, poluvodičke komponente, elektroničke sklopove, te kao ‘honorarni pečalbar’ vodio meteorološku stanicu na Velebitu, sudjelovao u ekološkim ispitivanjima preko tvrtke Dvokut. Na tim sam se poslovima prvi put susreo s pravim mikroprocesorima. Imali smo mjerne *bus* pun računala i senzora, sve pod nadzorom centralnog računala. Dva svijeta, digitalni i analogni, iznenada su mi se spojili.

Slično su postupili i drugi stručnjaci, Benčić, Perić, Flegar, svi su našli egzistenciju na fakultetima i školama, nastavili su raditi posao u kojem su bili ‘doma’.

4. priča: Zagrebački električni tramvaj (ZET)

Godine 1993. pozvali su me u ZET, na poslove glavnog projektanta, u cilju realizacije novih niskopodnih tramvaja, sustava kontrole i upravljanja prometom i sustava nove naplate karata.

Da se podsjetimo: Zagrebom je 5. rujna 1891. provozio konjski tramvaj. Zamijenjen je 18. kolovoza 1910. električnim tramvajem tvrtke Ganz-Mavag (Mađarska). Godine 1951. inženjer legenda ZET-a Dragutin Mandl¹⁶ inicirao je, projektirao i konstruirao prototip tramvaja buduće oznake TMK101, kapaciteta 95 putničkih mjesta, snage 2×60 kW i najveće brzine 60 km/h. Bio je to prvi domaći tip suvremenih tramvajskih kola s automatskim posluživanjem vrata, sjedalom za vozača i konduktera, električnim, mehaničkim i zračnim kočnicama te sigurnosnom napravom (zaštitnom košarom) ispred prednjih kotača, čiju je proizvodnju 1957. preuzela tvornica *Đuro Đaković* iz Slavonskog Broda. Poslije je razvijen tip TMK201 (odmilja nazvan Bik). Na njegovoj osnovi razvijen je čoperski tramvaj TMK2100, serija od 11 vozila, proizvođači: *Končar-Gredelj-Đaković*. U taj tip uklopljen je čoperski tiristorski pogon tvrtke ABB, centralno računalo i digitalno-analoga dijagnostika. ZET posjeduje još jedan ČKD tramvaj, KT351, također s tiristorskim čoperom i analognim upravljačkim sklopovima.

Moj je zadatak bio utvrditi kojim se tehničko-tehnološkim putem grade tračnička vozila u Europi i svijetu te usmjeriti tehničke zahtjeve natječaja za nova niskopodna vozila Zagreba. U tu sam svrhu gotovo četiri godine putovao

¹⁶Mandl, Dragutin (Zagreb, 4. travnja 1892. – Zagreb, 27. travnja 1959.), elektrotehnički i strojarški inženjer, konstruktor tramvaja, inovator i izumitelj. Diplomirao je 1919. elektrostrojarstvo u Beču.

u gradove s tramvajskim sustavima. Rezultat je bio neobičan tehnički zahtjevan vučni pogon. Naime, na suvremenim vučnim vozilima napušten je istosmjerni i uveden asinkroni pogon. Na istosmjernom naponu od 700 V vučni pogon bit će izmjenični?!

Moram priznati da sam izazvao zbunjenost tim zahtjevom, posebno kod dobitnika natječaja, *Končara*. Pokazalo se da su istosmjerni pogoni danas povijest te da onaj tko ne svlada izmjenične pogone nema što tražiti u području željezničke vuče. *Končar* je ZET-u isporučio 179 novih vozila oznake TMK200 i ima vrlo dobre ugovore s Hrvatskim željeznicama za slična vozila s izmjeničnim pogonom, ali s normalnim kolosijekom. Time je stekao vrlo važne referencije za međunarodne natječaje. I najvažnije, stekao je nova znanja.

Tehničko rješenje pogona

Trofazni asinkroni pogon realiziran je s IGBT¹⁷ tranzistorima. Upravljanje: PWMF, predikcijom momenta, vektorskom regulacijom (engl. *space vector regulation*), primjenom DSP-a¹⁸. Umjesto mjerenja momenta motora, koje je sporo (sekunde), DSP proračunom procjenjuje očekivanu vrijednost unutar 25 μ s te se time praktički trenutačno upravlja pogonom. Nema mrtvog vremena reakcije pogona, posebice kočenja, između odluke vozača i reakcije vozila. A regulira se klizanje motora s , preko mjerenja struje, brzine, težine,... i ti se podaci ubacuju u proračun vektorskog regulatora i pobude tranzistora. Pomoćni pogon: istosmjerni pretvarač u mosnom spoju s MOSFET tranzistorima za punjenje NiCd akumulatora napona 24 V, DSP je također realiziran suvremenom upravljačkom elektronikom.

Učinski dio izvorni je projekt *Končara*, kao i programska podrška. Nositelji projekta postali su novi digitalni inženjeri! Nisam se zamarao softverom jer je programska podrška bila u dvije razine, korisnički, nacrtaj shemu kao analogni sklop, i nemoj razmišljati kako je upustiti u procesor, kodirnikom (engl. *coder*), jezikom C+... ima tko to zna! Meni je bilo dovoljno nacrtati analognu shemu.

Slično sam riješio i modernizaciju zagrebačke uspinjače, predvidio pogon nove sljemenske žičare, sustava naplate karata, nadzora prometa... pranja vozila [3, 4, 5, 6]. Nisam bio svjestan da se moja inženjerska logika mijenja! U moj se analogni svijet počeo uplitati digitalni.

¹⁷IGBT (engl. *insulated gate bipolar transistor*), bipolarni tranzistor s izoliranim geitom

¹⁸ DSP (engl. *digital signal processor*), digitalni signalni procesor

5. priča: Dalmacija, tvrtka Pomak, *Pozdrav Suncu* i moj upad u digitalni svijet

Dogodilo se, vratio sam se “doma”, u Dalmaciju. Tvrtka *Pomak* (Split), čija su osnovna djelatnost vodoopskrbni sustavi, automatika pogona, npr. automatska tvornica klaka¹⁹ u Drnišu, Jadranplovovi svjetionici... . Taman za mene. Klasika, analogna! A tim digitalnih genijalaca sve je umrežavao i povezivao u svoje centre nadzora i upravljanja, žično, bežično, optikom. Jedno računalo nadzire od Dubrovnika do Šibenika magistralni vodovod. Ja sam komotno prepustao “digitalnim genijalcima” njihov svijet, a “prljavu elektriku” držao beskompromisno u svojoj domeni. Kao vepar u svojoj prljavoj bari, gušt do neba!

Nikad ne reci nikad! Na istoj su etaži u Tolstojevoj 32 u Splitu tvrtke Interligt i Pomak. Tvrtka Interlight dobila je projekt *Pozdrav Suncu* u Zadru. Niko Bašić osmislio je instalacije *Pozdrav Suncu* i *Morske orgulje* i kao umjetnička djela, spomenike koji ni u jednom trenutku nisu stacionarni. Primjerice, spomenik banu Jelačiću u Zagrebu ostaje jednak od postavljanja do njegova kraja. Nikini su spomenici nepredvidivi, u svakom trenutku drugačiji.

Glavni kompozitor mijena na spomenicima je more. Kako se more mijenja, mijenja se zvuk orgulja, ali i slika na monitoru *Pozdrav Suncu* – Sunca i planeta. Akustičar i glazbenik Ivica Stamać složio je sedam zvukovnih klastera od dva durska akorda (G i C6), koji se izmjenjuju – nazivali smo ih “skalinade”. Izbor tonova i akorda napravljen je na glazbenoj matrici klapske pjesme. Zagrebačka orguljarska radionica Heferer proračunala je svirale. Bojeći se korozije, koja u prvom redu može nauditi svirali, najprije se mislilo uporabiti okitenske cijevi²⁰. No kako je okiten termički labilan materijal, nije pogodan zbog nestabilnosti zazora labiuma (usta svirale). Zato je Goran Ježina predložio sviralu od inoksa, materijala koji se može precizno obraditi.

Ostao je izazov tehničkog rješenja *Pozdrava Suncu*. Dva su se direktora – Pomaka i Interlighta (Neven Kulišić i Sergej Skočić Buco), dogovorila da će prihvatiti izazov. Meni su povjerili tehnički dio – glavni projekt instalacije: opremu, povezivanje opreme te povezivanje zvuka orgulja, mora i slike na monitoru (televizoru Sunca i planeta i svjetlosnog zida).

Ja takav, nema što ne mogu? Prihvatio. Ups! Televizor promjera 30 m ugrađene snage 5 kW, prsten svjetlosnog zida snage 3 kW, centralno upravljanje, nadzor sustava s druge lokacije. Televizor: 10 000 piksela izveden s tri LED-a crvene, zelene i plave boje (RGB²¹). Svaki je piksel adresiran prema centralnom računalu. Svaki piksel upravlja se PWM-om kojim se može postići osam

¹⁹ **klak**, drugi naziv za živo vapno (CaO)

²⁰ **okitenska cijev**, polietilenska cijev

²¹ **RGB** (engl. *red, green, blue*), crvena, zelena i plava boja



a)



b)



c)



d)

Sl. 1.: *Pozdrav Suncu*: a) monitor, b) ugradbeni prostor, c) upravljačka soba, d) ulaz u upravljačku sobu

milijuna nijansi boja. Sustav je nabavljen od tvrtke Leurocom, a sustav svjetlosnog zida (60 lampi po 16 piksela) i upravljačko računalo snage 2,7 kW proizvod je tvrtke Space Cannon. Solarni generator snage 17 kW i sustav napajanja proizvela je tvrtka SMA²². Nadzor cijele instalacije, daljinsko upravljanje i komunikaciju projektirala je i proizvela tvrtka Pomak [7] (ja i moji digitalni genijalci Željko Lončar i Stipe Drviš). Na sljedećim su fotografijama prikazani neki detalji instalacije, kao ilustracija njezine složenosti.

Monitor je izveden za rad, potpuno potopljen u vodi (morskoj), na ljetnoj žezi, zimi u ledu i buri. Pod kontrolne sobe je dva metra ispod razine mora te je potpuno građevinski zaštićena od vode. Ulaz je poseban: HUB²³ tip vrata za

²²SMA, Solar Technology AG (Njemačka)

²³HUB (engl.),

vodovodne instalacije. Kao zaštita od prodiranja vode u postrojenje služi muljno okno s potopnom pumpom, a ventilacija je prisilna, s ventilatorom na vratima. I sve je “skriveno”, pod travom parka, radi umjetničkog dojma i zadovoljenja tehničkih zahtjeva.

Tad sam morao, htio – ne htio, znao – ne znao, učiti ponovno, povezivati različite svjetove, primijeniti i integrirati klasičnu analognu i učinsku elektriku (nazovimo je *dirty electrics*) s digitalnim procesorskim svijetom, te sve ugraditi u jedinstvene i specifične građevinske objekte. Morao sam stvoriti jedinstvenu sinergiju različitih svjetova. Konačno sam shvatio da su analogna-digitalna-građevinska tehnika dva-tri svijeta sa svojim pravilima igre. Našao sam se u situaciji da moram postati sustavski inženjer! Naučio sam da analogna i digitalna tehnika imaju potpuno različita pravila. Analogna tehnika komunicira električnim signalima, strujom, naponom, optikom, a digitalna komunicira protokolima! Građevinarska tehnika ima osnovu u betonu i mehaničkim silama. A što ako su u istom sustavu? Televizor u projektu *Pozdrav Suncu* bio je moj prvi i jedini projekt televizora u karijeri. Adresiranje piksela, matrica grafičke kartice,... ajme. Nemojte me pitati o mojim mukama da sve proradi i radi u sustavu. Ali, kako je poznato, radilo je 13 godina. I nakon nedavne modernizacije, po mojem glavnom projektu, radi i bolje. Instalacija je postala svjetska atrakcija.

Da se vratim na to kako sam u problemu shvatio odnos i razliku između analogne i digitalne tehnike, “prljave” i “profinjene tehnike”, “vepra” i “kirurga”. Zamislite situaciju da sustav ne reagira u trenutku kad mora raditi! Neće i neće. Nema slike. Ujutro na dan otvaranja atrakcije, uz pozvane važne uzvanike, ja uranim, da provjerim sve. Sve radi! Odem na kavicu, a netko na gradilištu napravi centralni ispad energetske mreže. Vratimo napon, sve uključim, a na monitoru ni “s” od slike. Sve drugo radi, a slike nema. Restartam sustav (osnova digitalaca: “ubij majmuna”), nekoliko puta i opet “mrak”. Nazovem *džokere*, softverske genijalce iz tvrtke, vrhunske: “Pomozite mi! “Njihov je odgovor bio:

“(...) Kako? Ja nemam na svom računalu tvoje protokole. Svi su kod tebe na tvom računalu u Zadru, a mi smo u Dubrovniku. Nema načina da te slijedimo i pomognemo... Ti si na izvoru. Žao nam je, snadi se.”

Ja u nevolji, navečer dolazi politička elita na otvorenje, a slike nema. Moja logika je analogna. Kvara, analognog, nema. Ako i ima, moram sve rastaviti, a ni vremena nemam? Moji digitalni *džokeri* nemaju protokole. Nazovem proizvođače, nitko od njih ne voli kad mu u istom računalu “stoluje” i netko drugi. A ja sve smjestio u jedno industrijsko računalo? Svaki svaljuje krivicu na drugog i kako nisu sa mnom na mojem računalu ne mogu učiniti ništa. Kako digitalne “tuljane” pomiriti? Nema mi druge, idem učiti... i nađem uzrok. Po *defaultu*, program za emitiranje slike bio je postavljen za ekran mojeg računala, a ne pod opcijom *clon*, koja omogućuje paralelni rad dvaju monitora?! Nađem

kvačicu, “klik! “ i... sve proradi. Prosvijetlio Zadar, ali i ja. Postao sam “hibrid” analogne i digitalne tehnike. Da ne kažem “klon”. Shvatio sam da iz mojeg toplog i ugodnog blata analogne tehnike, kao vepar u bari, moram, ako želim ostati u struci, navući digitalne kirurške rukavice koje ću zaprljati analognim blatom. Kako pjesnik reče: “Čašu meda nitko ne popi, da ju čašom žuči ne zali, smiješane, najslađe se piju! “

Dalje je bilo lakše. Novi projekt: sustav nadzora podzemnih voda sliva Cetine, 120 km, 200 senzora za mjerenje kaptiranih voda na dubinama do 800 m za akumulacijsko jezero Peruća. Kaptiranjem podzemnih voda održava se i nadzire nivo potencijalne energije jezera i osigurava proizvodnja električne energije. Svi su senzori na potrebnim dubinama, i do 800 m, autonomni, solar-ni generator, komunikacijski povezani bežičnom UKV vezom u centar elektro-distribucije HEP-a u Splitu. Sedam elektrana dalmatinskog sliva ovisi o tim podacima. Uz njih su vezane ceste, turizam, stanovništvo... Ja sam kao glavni i ovlašteni projektant morao imati cijeli projekt pod potpunom kontrolom, i u analognom i u digitalnom svijetu, signali i protokoli. Kao u crtiću Lucky Luke i njegov konj Jolly Jumper – ja, moje računalo i prljava elektronika, ja i moj *poni*.

6. priča: Dalmacija, tvrtka HAC²⁴, autocesta Dugopolje – i dalje, tunel Sveti Ilija, Biokovo, COKP-i, transformatorske stanice bez posade

Moj me nemirni duh odveo u HAC, Južni sektor, Dugopolje – Dubrovnik – most Pelješac, ceste, tuneli, vijadukti, pristupne ceste na novu trajektnu luku Drvenik, Luka Ploče, centri održavanja, kontrole i upravljanja prometom (COKP-i).

Energija potrebna tunelu dobiva se iz dviju transformatorskih stanica smještenih na ulazima tunela, svaka snage 7 MW i transformacijskog omjera 25 kV / 1 kV. One napajaju četiri transformatorske stanice raspoređene duž cijevi tunela pojedinačne snage 1 MW i transformacijskog omjera 1 kV / 400 V. Sve su stanice autonomne i umrežene u nadzorni sustav. Najveća su im trošila ventilacijski sustav, rasvjeta, nadzorna i signalizacijska oprema i vodovodne instalacije. Sva oprema tunela umrežena je prema centrima održavanja i kontrole prometa (3 COKP-a, Dugopolje, Zagvozd i Vrgorac.).

U ingerenciji elektrogrupe kojoj sam pripadao bila je i rasvjeta križanja i vijadukata. Posebno je rješenje izvedba povezivanja Luke Ploče i autoceste s

²⁴HAC, Hrvatske autoceste

energetskim sustavom Hrvatske i BiH te opremanje novog graničnog prijelaza Metković (budući šengenski prijelaz). Nadalje, tu je sustav meteoroloških senzora i cestovna signalizacija, stotine mjernih postaja i signalizacijske opreme, ventilacija i vodooodvodnja u tunelima i na vijaduktima te dinamičko upravljanje i nadziranje prometa. Komunikacija je analogna, optička i beskontaktna.

Pojavile su se i nove ideje vezano uz budućnost cestovnog prometa u priobalju, podmorske tunele za povezivanje otoka, nove trajektne luke... Suradnici su nam bili genijalci građevine, rudarstva, ekologije, strojarstva, vodoopskrbnog sustava, šumari...

Na nama električarima, “žicarima”, glavnim ovlaštenim inženjerima Zoranu Neveščaninu, Lazi Mandiću i mojoj malenkosti bila je odgovornost za integralnost sustava. Na sreću, svi smo prošli školu: analogne i digitalne tehnike, i školu nesukobljavanja s drugim “meštrima”. Protokoli su bili usvojeni, ali i tone betona, megavati snage, kubici vode, cementa, kamena,... I, moram priznati, mi električari ili “žicari” dolazili smo na kraju radova i, uglavnom, bili krivi za kašnjenja dovršetka radova.

Koliko nam je politika dopustila, obavili smo poslove. Kad je kasa presušila, ili su se politički odnosi promijenili, došlo je do prekida poslova ili usporavanja, od očitog primjera odustajanja od Pelješkog mosta, nove trajektne luke Drvenik, triju tunela Kotezi – more, trajektne luke Pelješac,... Način rješavanja prazne kase i političke igre bilo je smanjenje broja radnika prijevremenim umirovljenjima i davanjem otpremnina. (Nije li to poznata metoda iz *Končara*?)

7. Povratak

Nakon prijevremenog umirovljenja i osobne nevolje s oblikom leukemije, moj student i suradnik u Odjelu za istosmjerna napajanja malih snaga kojeg sam vodio u ETI-ju inženjer Marko Štetić zaposlio me na neodređeno vrijeme u svojoj tvrtki Mareton d.o.o. Zagreb, na pola satnice na razvoju uređaja učinske elektronike – izmjenjivača i UPS-a²⁵.

Vratio sam se počecima, učinskoj elektronici. Ali u novi svijet, nove komponente: MOSFET, IGBT, komponente na bazi SiC²⁶ i GaN²⁷, mikroprocesori DSP i MSP²⁸; novi simulacijski programi Plecsi, MathLab, Simulink, Kicad, Tina – novi nazivi poznatih tvrtki prema izboru novih vlasnika. Vrlo korisni

²⁵ UPS (engl. uninterruptible power supply), uređaj za neprekinuto napajanje

²⁶ SiC, silicijev karbid

²⁷ GaN, galijev nitrid

²⁸ MSP (engl. managed service provider),

simulacijski programi sad omogućuju zatvaranja povratnih veza sa svojstvima o kojima sam nekad mogao samo sanjati.

I, gle čuda, najbolje i najsuvremenije rezultate postiže *slide mode control* [8]. Regulacijski i upravljački sklopovi različitih topologija pretvarača lako se projektiraju, simuliraju i izvedu na DSP-ima ili MSP-ima koji su danas nezaobilazni, a mogućnosti doslovno neograničene. Moj početak u automatici u diplomskom radu, a Utkyn je ostao legenda te kontrole, njegov *sliding mode control* gotovo je nezaobilazan u složenim uređajima i sustavima! Moj prvi stručni rad, s analognim računalima, CSMP-om i Fortranom IV pokazao se kao neki oblik predviđanja suvremene robotike! Ja sam silom egzistencijalnih prilika ponovno uletio u svijet analogije, digitalije, mikroprocesora i ostalog, ali vratio sam se doma, početku, automatici.

Zaključak

Nakon svega, kako opet pjesnik reče, prisiljeni smo stalno učiti, iz literature, savjetovanja, otvorenih foruma, radom i iskustvom. Nemojmo biti isključivi, analogni ili digitalni, crni ili bijeli, ali učimo stalno, i primijenimo pravilno jedno ili drugo, ili najbolje, hibridno. Svaki je pristup dobar ako se pravilno koristi. A hibrid je možda najbolji? Danas to nazivamo *embedded, smart, intelligent!* Sutra *nano*?

Literatura

- [1] Vadim I. Utkyn: Variable structure systems with sliding modes, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222.
- [2] Zbornik radova III. savjetovanja o energetskej elektronici, svezak 3., Zagreb, 1978.
- [3] Želimir Ivanović: Tranzijentne pojave u sustavu napajanja zagrebačkih električnih tramvaja, *Automatizacija u prometu*, Dubrovnik, November, 2001., str. 124-128.
- [4] Želimir Ivanović: Influences of city traffic conditions on technical requirements and characteristics of tram vehicles, 11th EDPE, Dubrovnik, 1998.
- [5] Želimir Ivanović: Zagreb's funicular electrical system – short view, EDPE, Dubrovnik, 1998.
- [6] Želimir Ivanović: Primjena mehatronike u sustavu za upravljanje vratima na tramvajskim vozilima tipa TMK2100 ZET-a, Stubičke toplice, KoREMA, 2000.
- [7] Želimir Ivanović: Jedan uvid u stvarnu pouzdanost LED rasvjete – 10 godina iskustva *Pozdrav Suncu*, Korema 16.
- [8] Vadim I. Utkyn: Sliding mode control design principles and applications to electric drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, February 1993.

My Story: from Analog, over digital, power to embedded Electronics

Želimir Ivanović

Abstract: My story I have passed during my engineer education and profession, technical and technological changes, opinions, my falls, dilemmas, as one *Via Crucis*.

Keywords: studding's, engineer beginnings, engineer changes, engineer crises, new knowledges

