

Tehnologije, standardi i protokoli za komuikaciju u elektroenergetskim sustavima

Demšić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:111888>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Tehnologije, standardi i protokoli za komunikaciju u
elektroenergetskim sustavima**

Završni rad

Ivan Demšić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Ivan Demšić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. pristupnika, god.	4943, 27.07.2021.
JMBAG:	0165088738
Mentor:	doc. dr. sc. Denis Vranješ
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Tehnologije, standardi i protokoli za komunikaciju u elektroenergetskim sustavima
Znanstvena grana završnog rada:	Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	Zadatak završnog rada je dati pregled i kratak opis komunikacijskih tehnologija, standarda i komunikacijskih protokola u elektroenergetskim sustavima. Sumentor s FERIT-a: Mario Vranješ
Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	17.09.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	25.09.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:	30.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Demšić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4943, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	15

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Tehnologije, standardi i protokoli za komuikaciju u elektroenergetskim sustavima**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Denis Vranješ

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA	1
2. TEHNOLOGIJE ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA	2
2.1. Programabilni logički kontroler	2
2.2. Bežične mreže	4
2.2.1. Bežične osobne mreže (WPAN)	5
2.2.2. Bežične lokalne mreže (WLAN)	6
2.2.3. Bežične metropolitanske mreže (WMAN)	6
2.2.4. Bežične širokopojasne mreže (WWAN)	6
2.3. Komunikacija putem optičkog vlakna	7
2.4. Mikrovalne veze	8
2.5. Satelitska komunikacija	9
2.6. SCADA	10
2.7. EMS	11
2.8. AMI	12
3. STANDARDI ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA ..	13
3.1. ISO/OSI referentni model	13
3.2. TCP/IP model	16
3.3. IEC 61850 standard	17
3.4. IEEE 1711.2-2019 standard za sigurnost SCADA komunikacijskih protokola	18
3.5. IEEE 802 standard	18
3.5.1. IEE 802.3 standard	18
3.5.2. IEE 802.11 standard	18
4. PROTOKOLI ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA ..	20
4.1. TCP protokol	20
4.2. UDP protokol	22
4.3. Distributed Network Protocol 3 - DNP3	22
4.4. Modbus protokol	23

4.5. GOOSE protokol.....	23
4.6. OPC UA protokol.....	24
4.7. MMS Protocol	24
5. SIGURNOST KOMUNIKACIJE U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA	25
6. BUDUĆNOST KOMUNIKACIJA U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA	27
7. ZAKLJUČAK.....	28
LITERATURA	29
SAŽETAK.....	31
SUMMARY.....	32

1. UVOD

Današnji svijet se ne može zamisliti bez elektroenergetskih sustava koji nam pružaju mnoge mogućnosti i olakšavaju život. Od osvjetljenja prostorija i ulica, korištenja električne energije u domaćinstvu, komunikacije s ljudima diljem svijeta pa sve do modernih električnih automobila, pametnih kuća i kompleksnih postrojenja. Elektroenergetski sustavi su prisutni gotovo u svakom dijelu našeg života. Jedna od ključnih stvari koja omogućuje funkcionalnost, učinkovitost i pouzdanost elektroenergetskih sustava je komunikacija pojedinih dijelova sustava koja omogućuje razmjenu podataka. Komunikacija u sustavima nam omogućuje povezanost različitih dijelova koji obavljaju neke funkcije kao što su automatizacija, nadzor, upravljanje, kontrola, prijenos podataka i slično. Završni rad se bavi istraživanjem tehnologija, standarda i protokola koji su prisutni, kako u starijim sustavima, tako i u novijima. Proučavat će se kako ovi sustavi omogućuju razmjenu podataka između energetske postrojenja, distribucijskih mreža, pametnih mjernih uređaja i drugih ključnih komponenti infrastrukture. Također će se istraživati standardi kojima se sustavi projektiraju, implementiraju i održavaju.

1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Zadatak završnog rada je istraživanje i predstavljanje tehnologija, standarda i protokola za komunikaciju u elektroenergetskim sustavima, opisati na koji način funkcioniraju, kako se implementiraju i održavaju. Najvažniji dio je naglasiti važnost elektroenergetskih sustava u moderno vrijeme.

2. TEHNOLOGIJE ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

2.1. Programabilni logički kontroler

U prošlosti su ljudi bili zaduženi za upravljanje nekog sustava, ali sa pojavom električne energije i novih tehnologija pojavila se automatizacija. U početku su se koristili releji koji su služili za upravljanje električnom energijom bez potrebe za mehaničkim djelovanjem. Relej radi na način da prolaskom struje kroz zavojnicu stvara magnetsko polje i na taj način zatvara ili otvara kontakte koji zatim zatvaraju ili prekidaju strujni krug. Postoje dvije vrste kontakta, to su normalno otvoreni i normalno zatvoreni (engl. *normally open* - NO i engl. *normally closed* - NC). Kada relej nije aktivan, odnosno kada kroz zavojnicu ne prolazi struja, normalno zatvoreni kontakti zatvaraju strujni krug, a normalno otvoreni ne zatvaraju. Nakon djelovanja magnetskog polja na kontakte stanja se zamijene. Tako se pomoću jednog izvora električne energije upravlja većim brojem strujnih krugova. [1]

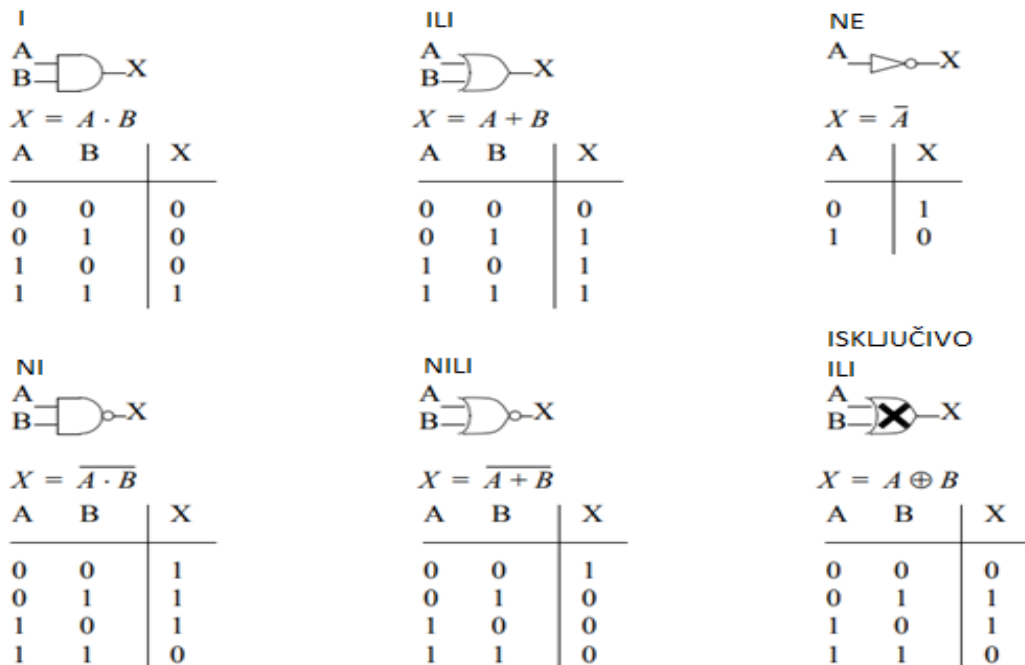
Programabilni logički kontroler (engl. *Programmable Logic Controller* - PLC) razvio se u sedamdesetim godinama dvadesetog stoljeća. PLC tehnologija počela se koristiti u tvornicama te se koristi i dan danas.

Prednosti korištenja PLC tehnologije:

- Niska cijena za kontrolu kompleksnih sustava
- Fleksibilni su i mogu se brzo i jednostavno ponovno upotrijebiti u drugim sustavima
- Precizna kontrola
- Pouzdane komponente ih čine dugotrajnijima
- Laka dijagnostika [1]

Za programiranje se koristi ljestvičasta logika (engl. *ladder logic*) kao metoda programiranja koja je razvijena da oponaša logiku releja. Time nije bilo potrebe za ponovnim educiranjem tehničara, električara i inženjera. Ovaj naziv se koristi zbog vizualnog izgleda programa, koji podsjeća na ljestve, odnosno niz horizontalnih linija povezanih s vertikalnim linijama. PLC čita program od vrha prema dnu u ciklusima koji su kontinuirani. Prilikom programiranja koriste se pojmovi ulaza, logičkih operacija, izlaza i brojača. Ulaze predstavljaju senzori, prekidači ili drugi uređaji koji šalju signale u PLC. Neki od tih senzora su: senzor temperature, senzor pritiska, senzor dodira, senzor vlage, senzor za količinu osvjetljenja, senzor brzine, senzor za udaljenost i

infracrveni senzor. Signali se učitavaju kao digitalni signali sa dva stanja (uključeno ili isključeno). Primjenom logičkih operacija, PLC upravlja izlazima tako da kontinuirano provjerava stanja ulaza i ovisno o stanjima uključuje ili isključuje izlaze. Slika 2.1. opisuje način rada logičkih sklopova gdje jedinica predstavlja uključeno, a nula isključeno stanje. Slovom A i B su označeni ulazi, dok X predstavlja izlaz iz logičkog sklopa. Izlazi su najčešće elektromotori, rasvjetni uređaji, ventili ili bilo koji drugi uređaji kojima je potrebno upravljati. PLC također ima mogućnost korištenja vremenskih sklopki (tajmera) da odgodi aktivaciju izlaza na određeno vrijeme, dok brojači služe za mjerenje vremena događaja. Kombinacijom ovih elemenata omogućuje se složenije upravljanje. Postoje razne izvedbe PLC-a, ali svaki od njih sadrži izvor energije, procesor, ulaze i izlaze te svjetla koja imaju ulogu indikatora. Da bi PLC radio, potreban mu je izvor električne energije koji može biti ugrađen u sam PLC ili zahtijeva vanjski izvor, najčešće su to istosmjerni naponi od 24 V i izmjenični naponi od 120 V ili 220 V. Procesor PLC-a je mjesto gdje se ljestvičasta logika procesira i pohranjuje. PLC sadrži više ulaza i izlaza te je svaki od njih označen. Indikatorska svjetla prikazuju status PLC-a ovisno o tome je li on uključen ili isključen, radi li program te postoje li pogreške. Indikatori svjetla imaju ključnu ulogu kod dijagnosticiranja problema.



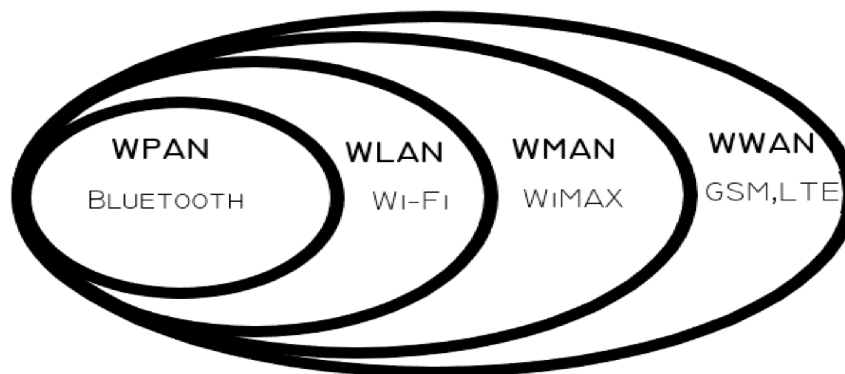
Slika 2.1. Logički sklopovi [1]

2.2. Bežične mreže

Bežične mreže su mreže koje koriste elektromagnetske valove za povezivanje uređaja bez potrebe za fizičkim kablovima. Uređaji su najčešće laptopi, računala, mobiteli, dlanovnici, printeri ili slični uređaji. Bežična infrastruktura smanjuje troškove u odnosu na strukturu koja bi zahtijevala fizičke konekcije te omogućuje uređajima da se povežu u kratkom vremenu bez obzira na njihovu udaljenost. Koncept rada bežičnih mreža je sličan žičanim mrežama, ali bežične mreže zahtijevaju da informacija bude pretvorena u oblik pogodan za prijenos putem zraka. Najveća mana bežičnih mreža je ta što bilo tko unutar dometa može pristupiti informaciji ako ona nije zaštićena. Također je problem interferencija elektromagnetskih valova stoga države moraju imati regulacije koje definiraju frekvencije i jačine signala za različite tehnologije.

Bežične mreže se mogu podijeliti na četiri grupe koje se temelje na području djelovanja mreže i njihov domet je prikazan na slici 2.1:

- Bežične osobne mreže (engl. *Wireless Personal-Area Networks* - WPAN)
- Bežične lokalne mreže (engl. *Wireless Local-Area Networks* - WLAN)
- Bežične metropolitanske mreže (engl. *Wireless Metropolitan-Area Networks* - WMAN)
- Bežične širokopojasne mreže (engl. *Wireless Wide-Area Networks* - WWAN)



WPAN - DO 10 METARA
WLAN - DO 100 METARA
WMAN - DO 50 KILOMETARA
WWAN - VIŠE OD 50 KILOMETARA

Slika 2.1. Klasifikacija bežičnih mreža [2]

Svaka država ima različite frekvencije koje se koriste, ali najčešće su to 2.4 GHz i 5GHz. Dostupnost tih frekvencija omogućuje korisnicima da koriste usluge besplatno i bez licence. LAN i PAN svrstavaju se u mreže ograničenog i malog dometa dok se WMAN i WWAN koriste u većim dijelovima kao što su gradovi pa sve do cijelih država i kontinenata. Njihov cilj je da povežu korisnike globalno, a u nekim slučajevima se koristi i satelitska komunikacija.

2.2.1. Bežične osobne mreže (WPAN)

WPAN se temelji na IEEE 802.15 standardu te omogućuje komunikaciju u prostoru veličine do 10 metara. Uređaji povezani unutar bežičnih osobnih mreža nemaju povezanost sa vanjskim svijetom ili je ona iznimno mala. To omogućuje implementaciju malih, energetski učinkovitih, jeftinih rješenja za širok raspon uređaja kao što su pametni telefoni, dlanovnici, bežične slušalice i slično.[2] Karakteristike ovih mreža su niska potrošnja energije i male brzine prijenosa podataka. Brzina prijenosa podataka je broj bitova prenesenih ili primljenih u jedinici vremena, a mjerna jedinica je bit/s.

Najpoznatija tehnologija je Bluetooth. Bluetooth omogućuje komunikaciju na malim udaljenostima između različitih uređaja poput pametnih telefona, računala, slušalica, zvučnika i sličnih, a temelji se na IEEE 802.15.1 standardu. Koristi frekvenciju od 2.4 GHz. Naglasak je na njegovu malu potrošnju energije što omogućuje dulji vijek korištenja bežičnih uređaja. Bluetooth je podijeljen u tri klase kao što je opisano u tablici 2.1. *Piconet* je izraz koji se koristi kao Bluetooth mreža, a predstavlja odnos do osam aktivnih uređaja. Uređaji su u odnosu glavni-podređeni (engl. *master-slave*), gdje je prvi uređaj glavni, a ostalih sedam podređeni. Svaka veza je kodirana kako bi se zaštitila od prisluškivanja i smetnji.

Tablica 2.1. Podjela Bluetooth-a prema klasama.

Klasa	Maximalna snaga	Domet
Klasa 1	100mW	100 metara
Klasa 2	2.5mW	10 metara
Klasa 3	1mW	1 metar

2.2.2. Bežične lokalne mreže (WLAN)

Lokalne mreže dizajnirane su za pružanje usluga bežične mreže u dometu do 100 metara i većinom se koriste u domovima, školama, uredima i kampusima. Omogućuje korisnicima slobodno kretanje unutar prostora te pritom ostaju spojeni na mrežu. WLAN se temelji na IEEE 802.11 standardu koji se marketinški naziva Wi-Fi. Bežična konekcija se ostvaruje pomoću usmjerivača. Glavna funkcija usmjerivača je usmjeravanje paketa podataka između različitih mreža i povezivanje uređaja u dometu. Najčešći primjer je povezivanje kućne mreže (WLAN) sa Internetom (WWAN). Usmjerivači često dolaze s ugrađenom zaštitom koja uključuje vatrozid (engl. *firewall*) i zaštitu od neovlaštenog pristupa.

2.2.3. Bežične metropolitanske mreže (WMAN)

WMAN pokriva puno veće područje u usporedbi s lokalnim bežičnim mrežama. Mreža može pokrivati cijeli grad ili više manjih gradova u blizini. WMAN-ovi se temelje na IEEE 802.16 standardu koji se često naziva svjetska interoperabilnost za mikrovalni pristup (engl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX*)[2]. WMAN mreže koriste bazne stanice postavljene na visokim zgradama i tornjevima kako bi omogućile prijenos podataka na velikim udaljenostima. WMAN može nastati međusobnim povezivanjem više manjih bežičnih LAN-ova putem WiMAX-a. Radi slično kao i Wi-Fi, ali pokriva veće udaljenosti. Pokriva frekvencijske pojaseve od 2 GHz do 11 GHz i između 10 GHz i 66 GHz te može prenijeti oko 70 Mb/s na udaljenosti do 50 kilometara. Na frekvencijama između 2 GHz i 11 GHz, antene ne zahtijevaju radiooptičku vidljivost kako bi komunicirale, a razlog su niske frekvencije pri kojima su utjecaji smetnji fizičkih objekata znatno manji. Visoke frekvencije zahtijevaju radiooptičku vidljivost između antena kako bi komunicirale na velikim udaljenostima.

2.2.4. Bežične širokopojasne mreže (WWAN)

Bežične mreže širokog područja protežu se preko 50 kilometara i obično koriste licencirane frekvencije. Ove vrste mreža se koriste na velikim područjima, poput gradova ili država, putem višestrukih satelitskih sustava ili antenskih mjesta za koje se brine pružatelj internetskih usluga. Postoje dvije dostupne tehnologije: mobilne telefonske mreže i sateliti.[2] Mobilne telefonske mreže su bežične mreže koje omogućuju korisnicima primanje i upućivanje telefonskih poziva, tekstualnih poruka i pristup Internetu sa svojim mobilnim uređajima. Bazne stanice podijeljene su na manje geografske regije zvane ćelije. Ćelije su raspoređene tako da one s istom frekvencijom budu dovoljno udaljene da ne dođe do interferencije te se na taj način bolje iskorištava

frekvencijski prostor. Potrebno je osigurati da se korisnik može kretati željenim područjem bez prekida komunikacije kada prelazi iz jedne ćelije u drugu. Bazna stanica na koju je korisnik spojen ima informaciju o jačini signala mobilnog uređaja. Ukoliko ta bazna stanica primi informaciju od susjedne bazne stanice da isti korisnik ima bolji signal, tada se kontrolnim porukama usuglase i korisnik se prespaja na stanicu sa jačim signalom. Bazne stanice komuniciraju s drugim baznim stanicama i s mobilnim komutacijskim centrom (eng. *Mobile Switching Centre*) koji je direktno povezan s javnom komutiranom telefonskom mrežom (eng. *Public Switched Telephone Network* - PSTN). Tako korisnik može uspostaviti komunikaciju s drugim korisnicima u bilo kojem trenutku. Prvu generacija mobilnih mreža (1G) čine analogni sustavi koji su dizajnirani samo za potrebe glasovnih poziva i dostižu brzine prijenosa podataka do 2.5 kbit/s. Druga generacija (2G) zasniva se na digitalnoj tehnologiji i uvodi tekstualne poruke, a brzine prijenosa podataka dostižu do 64 kbit/s. Treća generacija (3G) povećala je brzine prijenosa podataka do 2 Mbit/s, ali je i uvela bolji pristup multimediji i brzi internet. Četvrta generacija (4G) je bazirana na 3G mreži, ali je poboljšana novom tehnologijom zvanom dugoročna evolucija (engl. *Long Term Evolution* – LTE). Dostiže brzine i do 1 Gbit/s, poboljšava kvalitetu video poziva, ali je i dostupna na mjestima gdje 3G mreža nije. Peta generacija (5G) dizajnirana je kako bi povezala gotovo sve zajedno što uključuje strojeve, objekte i uređaje te pružila velike brzine prijenosa podataka do 10 Gbit/s i nisku latenciju. Satelitska komunikacija, kao što i samo ime kaže, koristi satelite da bi pokrila velike površine. Zbog njihove udaljenosti od Zemlje, pogodni su za korisnike koji žive na mjestima gdje podmorski kablovi nisu dostupni. Komunikacija se odvija tako da korisnik pošalje signal koji se potom pojačava i ponovo šalje na nekoj drugoj frekvenciji.

2.3. Komunikacija putem optičkog vlakna

Sustav komunikacije putem optičkog vlakna sličan je ostalim sustavima za komunikaciju. Na početku dolazi izvor informacija koji pomoću električnog odašiljača šalje signale prema optičkom izvoru, gdje se generiraju svjetlosni impulsi koji putuju do optičkog detektora putem optičkog kabla nakon čega se signal pretvara u nama korisnu informaciju. Optičko vlakno je tanka staklena ili plastična nit koja se nalazi unutar ovojnice koja je također plastična ili staklena te je obavijena dodatnim zaštitnim slojem. Kao izvor svjetlosnog signala koriste se svjetleća dioda (engl. *Light Emitting Diode* - LED) dioda ili poluvodički laser. Jednim optičkim vlaknom postižu se brzine i do 100 Gbit/s, a pretpostavlja se da je teoretski maksimum preko 50 Tbit/s. [3]

Prednosti optičke tehnologije su:

- malo prigušenje - omogućava velike dionice između regeneratora.
- veliki frekvencijski opseg – omogućava velike brzine prijenosa informacija.
- mali šum – mala učestalost pogreške (engl. *Bit Error Rate* - BER).
- mala specifična težina materijala (1g kvarcnog stakla ima iste performanse kao 10kg bakra).
- izostanak radijacije u okolinu
- ekonomski faktor - masovna primjena dovela je do pada cijena i veće dostupnosti.

Kod prijenosa dolazi do određenih izobličenja signala. Prigušenje je definirano kao omjer snaga ulaznog i izlaznog optičkog signala na optičkoj komponenti te ograničava domet optičkog signala. U praksi se koriste područja valnih duljina u kojima je prigušenje najmanje. Disperzija optičkog signala predstavlja njegovo izobličenje u vremenskoj domeni tijekom prijenosa optičkom vlaknom, a za posljedicu ima ograničenje brzine i dometa. Materijalna disperzija nastaje zato što brzina propagacije ovisi o indeksu loma, a budući da indeks loma ovisi o valnoj duljini, optički signali sa različitim valnim duljinama šire se kroz vlakno različitim brzinama. Izvori svjetla su poluvodičke svjetleće diode ili laserske injekcijske diode. Laserski izvor je superioran nad svjetlećim diodama zbog mogućnosti velike brzine modulacije i bolje efikasnosti kod ubacivanja svjetlosti u vlakno. Kod prijemnika (detektora) koristi se direktna detekcija. Za fotodetektore se primjenjuju dva rješenja: PiN fotodioda i Lavinska dioda. PiN fotodioda se koristi za brzine prijenosa reda do 100 Mbit/s. Lavinske diode koriste se za brzine od 10 Mbit/s pa sve do Gbit/s i to na valnim duljinama između 800 i 1600 nm. Koriste se tri vrste pojačala: optičko pojačalo snage (engl. *Booster Optical Amplifier* - BOA), linijska optička pojačala (engl. *Line Optical Amplifier* - LOA) i optička predpojačala (engl. *Optical Pre-Amplifier* - OPA). Optičko pojačalo snage postavlja se nakon predajnika da bi snagu podigli na željenu razinu, linijska optička pojačala koriste se za kompenzaciju gubitaka optičke snage zbog prigušenja u optičkom vlaknu, a optička predpojačala pojačavaju signal prije optičkog prijemnika i na taj način podižu njegovu osjetljivost.

2.4. Mikrovalne veze

Mikrovalne veze se odnose na komunikacijske veze ili tehnologije koje koriste frekvencije u području mikrovalova za prijenos podataka ili signala. Mikrovalne frekvencije se nalaze u opsegu od 3 GHz do 300 GHz i imaju kratke valne duljine. Danas se primjenjuju u bežičnoj komunikaciji, bežičnim sustavima za sigurnost, radarima, medicinskim sistemima, mikrovalnim pećnicama i

astronomiji. Frekvencije mikrovalova slične su frekvencijama titranja atoma i molekula u tvarima pa se upotrebljavaju za proučavanje atomske strukture tvari.

Pogodnosti mikrovalne veze:

- Veća propusnost (izravno povezana s brzinom prijenosa podataka) može se ostvariti na višim frekvencijama. 1% propusnosti na 600 MHz je 6 MHz i može pružiti brzinu prijenosa podataka od oko 6 Mb/s, dok je na frekvenciji od 60 GHz 1% propusnosti 600 MHz što je brzina prijenosa podataka 600 Mb/s.
- Mikrovalni signali putuju pravocrtno i nisu savijeni ionosferom kao što je to slučaj kod signala niže frekvencije.
- Zbog mogućnosti proboja atmosfere, reflektiranja od objekata i male duljine radiovalova mikrovalovi su pogodni za korištenje kod radara.
- Razne atomske, molekularne i nuklearne rezonancije javljaju se na mikrovalnim frekvencijama. To mikrovalne frekvencije čini pogodnima u području znanosti, medicinske dijagnostike, daljinskog očitavanja, liječenja i grijanja.[4]

2.5. Satelitska komunikacija

Satelitska komunikacija koristi satelite za pružanje usluga glasovne komunikacije, video poziva, interneta, faksa, televizije, radio kanala i koristi se u vojne svrhe. Satelitska komunikacija pruža mogućnost komunikacije na velikim udaljenostima te može raditi u okolnostima i uvjetima koji nisu mogući za druge oblike komunikacije kao na primjer komunikacija ne mjestima gdje podmorski kabeli nisu dostupni.

Značajke satelitske komunikacije:

- Sateliti koji se koriste u satelitskim komunikacijama obično su u geostacionarnoj orbiti (oko 35700 kilometara od Zemlje).
- Sateliti pokrivaju sve dijelove Zemlje, kako kopnene tako i morske dijelove.
- Za rad joj nije potrebna zemaljska infrastruktura.
- Satelitska komunikacija pruža vrhunske performanse.
- Trošak implementacije satelitskih komunikacija veći je u odnosu na većinu drugih oblika komunikacije.
- Kako je manje ranjiv od ostalih oblika komunikacije, često se koristi u obrambene svrhe.

- Satelitska komunikacija također pruža informacije o vremenu.
- U slučaju vremenskih nepogoda komunikacija je i dalje ostvariva.
- Velika količina podataka može se prenijeti uz pomoć satelita. [5]
- Sateliti se koriste za istraživanje svemira
- Prate klimatske uvijete

Sateliti koriste velike površine solarnih panela kako bi se opskrbili električnom energijom potrebnom za njihov rad, a višak energije pohranjuju unutar baterija. Korisnik koristi antenu koja u ovom slučaju predstavlja zemaljsku stanicu. U početku komunikacije zemaljska stanica šalje radio signal koji se naziva uzlazna veza (engl. *uplink*), a satelit pojačava signal i šalje ga nazad na Zemlju signalima koji se nazivaju silazne veze (engl. *downlink*). Sateliti se lansiraju u orbitu pomoću raketa koja ih zatim postavlja u specifičnu orbitu oko Zemlje koja ovisi o namjeni satelita. Satelit nakon toga mora sam povremeno održavati orbitu koristeći svoje pogonske sustave koji zahtijevaju gorivo. Životni vijek satelita je ograničen, a ovisi o količini goriva, stanju opreme i degradaciji solarnih panela.

2.6. SCADA

Nadzorno-upravljački sustavi za prikupljanje podataka (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) koriste se za kontrolu, nadzor i analizu industrijskih uređaja i procesa. Sustav se sastoji od softverskih i hardverskih komponenti i omogućuje daljinsko upravljanje i prikupljanje podataka iz industrijske opreme. Na taj način omogućuje kompanijama daljinsko upravljanje industrijskim postrojenjima kao što su na primjer hidroelektrane, vjetroelektrane i tvornice. SCADA sustavi se vrlo često koriste u proizvodnji, prijevozu, nadzoru vodostaja, sustavima obnovljivih izvora energije, naftnim rafinerijama te u distribuciji i kontroli električne energije. SCADA sustavi služe za poboljšanje performansi postrojenja, praćenje efikasnosti te uklanjanju grešaka i padova sustava. [6] SCADA sustav sastoji se od terenskih uređaja, kontrolera, glavnog računala smještenog u kontrolnoj sobi, sučelja za upravljanje te od infrastrukture koja služi za komunikaciju, a može biti žičana ili bežična. Terenski uređaji mogu biti senzori, ventili, brojlila ili bilo koji uređaj koji može prikupljati podatke o radu postrojenja. Za kontrolu se koriste programabilni logički kontroleri ili udaljene terminalne jedinice (engl. *Remote terminal unit* - RTU). RTU su mikroručunala koja prikupljaju podatke koje su izmjereni terenskim uređajima i šalju ih glavnom računalu, dok PLC služi za upravljanje dijelovima postrojenja. Sučelje čovjek-stroj (engl. *Human Machine Interface* - HMI) je grafičko sučelje zaduženo za prikaz podataka u stvarnom vremenu. Čovjek pomoću HMI-a, bilo serverskog ili lokalnog, može lako promatrati rad

cijelog postrojenja i upravljati nekim njegovim postavkama. Postoje slučajevi u kojima se greške automatski uklanjaju i prijavljuju te nije potrebna ljudska reakcija. Za komunikaciju se često koristi protokol nadzora prijenosa/Internet protokol (engl. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* - TCP/IP) protokol koji je opisan kasnije u radu.

2.7. EMS

Sustav za upravljanje energije (engl. *Energy Management System* - EMS) kombinira softver i hardver za upravljanje potrošnje energije u stvarnom vremenu. Optimizira protok energije između distributera i potrošača, ali i prikuplja, analizira i vizualizira podatke u stvarnom vremenu. Glavni dijelovi EMS-a su pristupnik, sučelje i program. Pristupnik obrađuje i prikuplja podatke, a program je napravljen kako bi naprednim algoritmima postavljao ograničenja i pravila prema posebnim potrebama. Sučelje omogućava korisniku da vizualizira podatke i sam po svojim potrebama namješta parametre energetske sustava. Prema području namjene EMS se dijeli na četiri dijela: Sustav za upravljanje energije u kućanstvu (engl. *Home Energy Management System* - HEMS) koji se koristi u kućanstvima za upravljanje manjim električnim potrošačima, sustav za upravljanje energije u stambenim zgradama (engl. *Building Energy Management System* - BEMS) koji se koristi u zgradama i to najčešće za upravljanje sustava grijanja, sustav za upravljanje energije u tvornicama (engl. *Factory Energy Management System* - FEMS) za upravljanje proizvodnje i potrošnje energije u industrijskom sektoru i sustav za upravljanje energije u zajednici (engl. *Community Energy Management System* - CEMS) koji objedinjuje ostala tri. [7]

Tipovi EMS-a temeljeni na načinu upravljanja:

- **Upravljanje na temelju pravila:** Sustav koristi pravila koja su unaprijed definirana kako bi donio odluke u stvarnom vremenu o alokaciji energije.
- **Upravljanje na temelju predviđanja:** Sustav upravljanja energijom temeljen na prognozi. Koristi se u slučajevima gdje se na temelju pravila ne može predvidjeti situacija. Sustav koristi podatke iz solarnih panela, baterija i potrošača općenito, ali i u proračun stavlja podatke kao što su vremenska prognoza, trenutna cijena energenata i slično. Na taj način EMS donosi pametne odluke kako i kada upravljati energijom.

- **Upravljanje uz pomoć cloud-a:** Uz pomoć cloud-a EMS može primiti podatke i upravljati parametrima na velikim udaljenostima. Najčešće se za to koriste senzori i uređaji za mjerenje koji prikupljaju podatke, a prikazom podataka u pravom vremenu, korisnik bez potrebe da bude blizu postrojenja može pratiti njegov rad.[7]

EMS se koristi u e-mobilnosti za optimizaciju punjenja električnih vozila, ali i za ograničavanje autonomne vožnje na način da se osigurava štednja energije tamo gdje je to moguće i sprječava preveliku potrošnju. Predviđa raspored punjenja na temelju duljine puta, opterećenja u smislu kilaže, uvjeta na cesti i ostalih okolnosti. Sve je češća uporaba EMS-a u bijeloj tehnici (hladnjaci, perilice rublja, perilice suđa). Najčešća primjena je kod sustava sa solarnim panelima jer EMS omogućuje efikasniji način rada. Koristi vremenske prognoze i navike potrošača da odluči kada je najbolje vrijeme za očuvanje, a kada za korištenje energije dobivene iz solarnih panela. EMS omogućuje puni potencijal dizalica toplina tako da regulira temperature i koristi ih u vrijeme kada je električna energija jeftinija.

2.8. AMI

Napredna infrastruktura za mjerenje (engl. *Advanced Metering Infrastructure* - AMI) je sustav za komunikaciju između mjernih uređaja i korisnika. Sustav prati podatke, pohranjuje ih i analizira, a ti podaci mogu biti količina električne energije, plina ili vode. Glavni dio su pametna mjerila koja podatke automatski šalju korisniku u određenim intervalima. Ti podaci se u daljnjem procesu provjeravaju i prolaze kroz nekoliko procesa kako bi ih korisnik smisleno mogao pročitati. Pomoću rezultata mjerenja korisnik može samostalno donijeti odluke koje će utjecati na daljnje korištenje energije. Također AMI sustavi su korisni u detektiranju kvarova koji mogu nastati, a to mogu biti kratki spojevi, nestanci električne energije, curenje plina i slično. Ugrađen je program koji potiče potrošače da smanje potrošnju svojih energenata kada je potražnja velika. U slučajevima nestanka električne energije, AMI sustav to automatski prijavljuje i ukoliko je došlo do nestanka zbog kvara upućuje lokaciju na kojoj se kvar dogodio. Daljinsko upravljanje je jedna od pogodnosti AMI sustava koja omogućuje uključivanje i isključivanje energije. Daljinsko upravljanje može biti korisno u slučajevima kada je prostor u najmu, a osoba odbija platiti račun. AMI sustav detektira svaku krađu energije tako što nadzire sve dobitke i gubitke i ukoliko primijeti nepravilnost šalje poruku korisniku o potencijalnoj krađi. Kao i EMS, AMI može biti prisutan u sustavima sa obnovljivim izvorima energije, ali je u tom slučaju EMS bolji odabir jer je on napredniji i ima funkcije koje pružaju korištenje sustava u punom potencijalu.[8]

3. STANDARDI ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

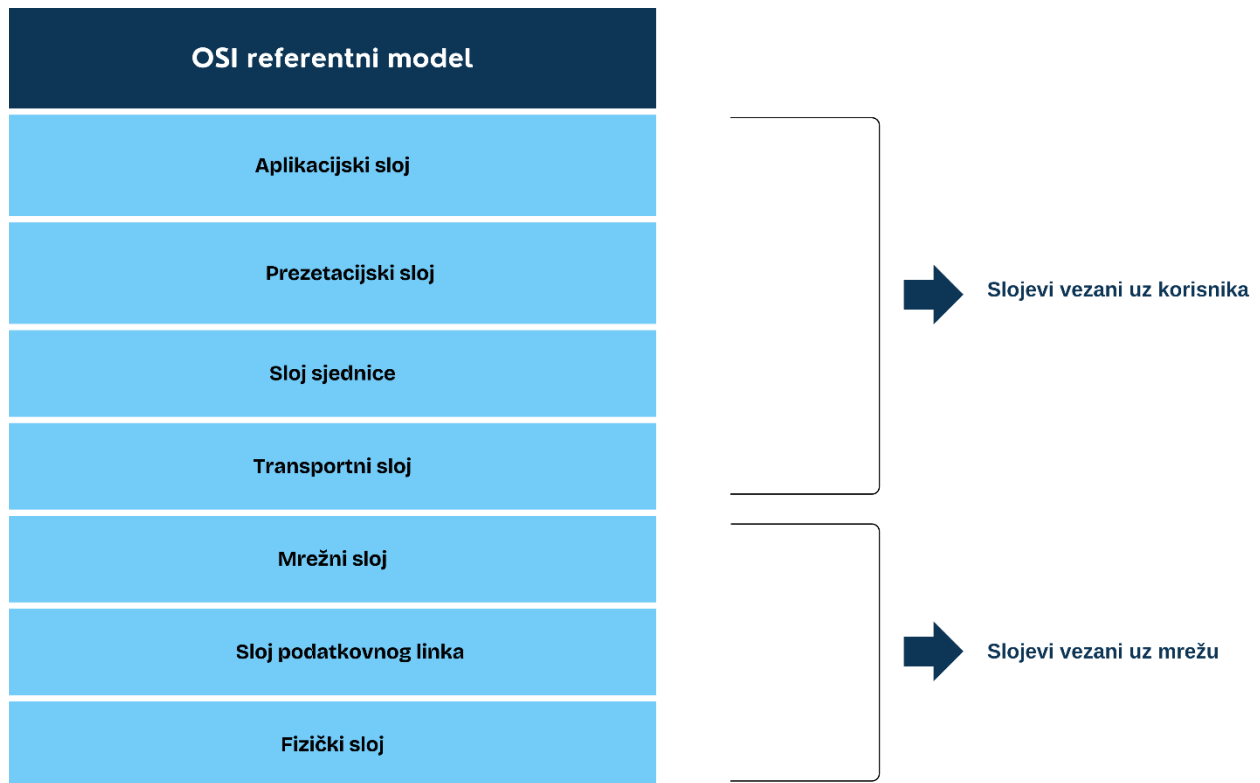
Do razvoja standarda i protokola je došlo zbog nekompatibilnosti između protokola različitih proizvođača pa kako bi se ti problemi riješili osnovane su međunarodne organizacije sa ciljem usklađivanja proizvoda različitih proizvođača. Međunarodne organizacije poput instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (engl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*), međunarodne elektrotehničke komisije (engl. *International Electrotechnical Commission - IEC*) i nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (engl. *National Institute of Standards and Technology - NIST*) odlučuju o standardima za protokole i komunikacije koje se koriste u elektroenergetskim sustavima. One osiguravaju povezanost, sigurnost, pouzdanost i efikasnost elektroenergetskih sustava. Standardi kao i protokoli su mnogobrojni te će se navesti samo neki primjeri.

- IEEE je organizacija posvećena naprednim inovacijama i tehnologijama koje pridonose čovječanstvu. Najveća je organizacija u području tehnike koja pomaže ljudima koji se bave u području elektronike, struje, računala, programa i svim ostalim povezanim znanostima i tehnologijama. Osnovana je 1963. godine u Americi. Jedna od ključnih funkcija IEEE je razvoj industrijskih standarda.[9]
- IEC je neprofitabilna organizacija čiji je cilj standardizirati tehničke inovacije, razvoj infrastrukture, učinkovit i stalan pristup energiji, transportne sustave, a rade i na ublažavanju klimatskih promjena i povećanju sigurnost ljudi i okoliša. IEC okuplja oko 170 zemalja i pruža globalnu platformu za standardizaciju. Definira sustave za ocjenjivanje sukladnosti čiji članovi potvrđuju da uređaji, instalacije, sustavi, usluge i ljudi rade kako je potrebno. IEC je objavio oko 10 000 međunarodnih standarda i omogućio prodaju i kupnju sigurnih i pouzdanih proizvoda u većini zemalja svijeta.[10]
- NIST je ključna savezna agencija unutar Ministarstva trgovine Sjedinjenih Američkih Država. Glavna funkcija mu je unapređenje mjeriteljskih znanosti, standarda i tehnologija na način koji poboljšava ekonomsku sigurnost i poboljšava kvalitetu života. [11]

3.1. ISO/OSI referentni model

Međunarodna organizacija za standardizaciju/Model otvorenih komunikacija (engl. *International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection Reference Model - OSI*) je slojeviti i apstraktni model koji služi kao osnova za dizajn i implementaciju stvarnih

sustava te opisuje kako informacija putuje kroz mrežu. Podijeljen je u sedam slojeva, a svaki od njih opisuje skup povezanih funkcija koje omogućuju jedan dio komunikacije. Rastavlja mrežu na manje dijelove kako bi se pojednostavilo rukovanje mrežom, omogućuje različitim uređajima i programima međusobnu komunikaciju i sprječava širenje promjena jednog sloja na druge slojeve.



Slika 3.1. Slojevi OSI referentnog modela [12]

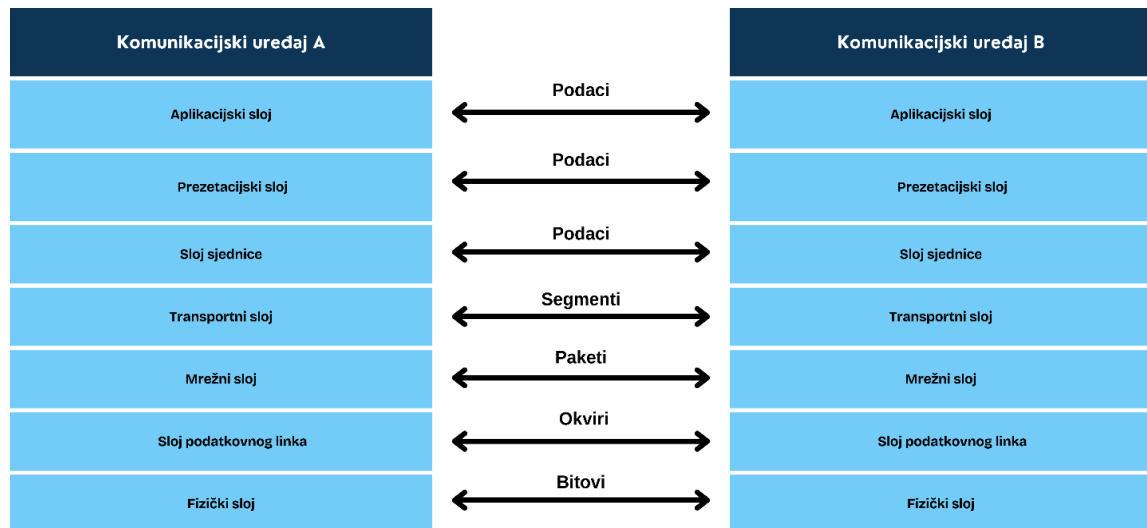
Svaki sloj komunicira sa prvim sebi višim slojem i prvim sebi nižim slojem. Struktura je takva da viši sloj koristi usluge nižeg sloja, a pruža usluge višem sloju.

Uloge slojeva OSI referentnog modela:

- **Aplikacijski sloj:** Pruža usluge aplikacijama, a ne korisniku, ali krajnji korisnik mora pozvati i izvršiti naredbu unutar aplikacije da bi se izveo prijenos podataka. Pruža mrežne usluge aplikacijama i upućuje zahtjev za usluge prezentacijskog sloja.
- **Prezentacijski sloj:** Brine se da podaci budu razumljivi i čitljivi na određitu, brine o formatu i strukturi podataka i pregovara o sintaksi prijensa za aplikacijski sloj.

- **Sloj sjednice:** Zadužen je za uspostavljanje, prekidanje i upravljanje veza između aplikacija.
- **Transportni sloj:** Osigurava pouzdan prijenos podataka između uređaja. Zadužen je za otkrivanje i uklanjanje grešaka u prijenosu. Kada grešku nije moguće ispraviti traži ponovno slanje. Uspostavlja, održava i prekida virtualne komunikacijske krugove. Primjer virtualnog kruga je telefonski poziv, gdje korisnik bira broj, uspostavlja vezu i priča sa sugovornikom. Tijekom poziva postoji virtualni krug, a nakon završetka poziva on se prekida.
- **Mrežni sloj:** Odabire najbolju putanju za pakete podataka. Ne vodi računa o pouzdanoj dostavi, za to je zadužen protokol nadzora prijenosa (engl. *Transmission Control Protocol* - TCP protokol koji djeluje unutar transportnog sloja. Koristi logičko adresiranje IP (engl. *Internet Protocol*) adresa.
- **Sloj podatkovnog linka:** Zadužen za pouzdan prijenos podataka putem medija. Zadužen je za povezanost i odabir putanje između uređaja.
- **Fizički sloj:** brine se o fizičkim komponentama mreže, a to su mediji za prijenos (optički vodovi, radio valovi, bakar), razine napona, signali, konektori i brzinama prijenosa podataka.[12]

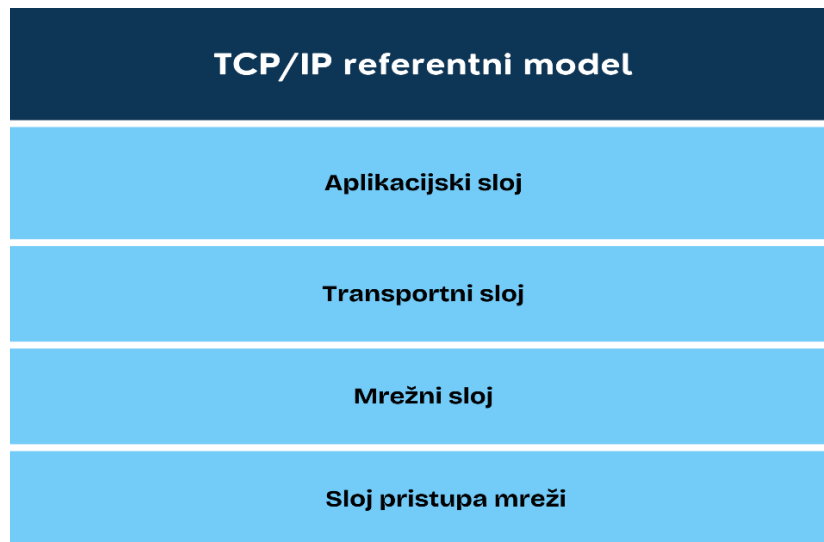
Komunikacija između dva OSI modela se odvija na način da svaki sloj komunicira sa slojem iste razine. Takav oblik komunikacije se naziva ravnopravna komunikacija (engl. *peer to peer communication*). Tijekom komunikacije slojevi razmjenjuju informacije zvane podatkovne jedinice protokola (engl. *Protocol Data Units* - PDUs). Svaki od slojeva ima određen tip podataka kojim komunicira kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Ravnopravna komunikacija [13]

3.2. TCP/IP model

Osim OSI modela postoje i drugi modeli koji služe kao smjernice u razvoju mrežnih komunikacija. Jedan od tih modela je i TCP/IP model. Razvilo ga je Američko ministarstvo obrane sa ciljem da mreža preživi teške uvjete, uključujući i nuklearne ratove. Bilo tko ga je mogao koristiti što je dovelo do njegovog ubrzanog razvoja, a pogodan je za sve komunikacijske medije poput bakrenih vodiča, mikrovalova, optičkog vlakna i satelita. Za razliku od OSI modela TCP/IP model ima samo četiri sloja koji su prikazani na slici 4. Možemo vidjeti kako ovaj model ne definira fizički sloj već pruža mogućnost prilagođavanja različitim oblicima mreže poput Etherneta, Wi-Fi-a, optike pa čak i starijih tehnologija. Kada se nešto želi poslati putem interneta, TCP/IP model podijeli podatke u pakete te ih šalje svakog posebno. Kada svi paketi stignu na odredište, ponovo se kombiniraju tako da sadržavaju originalnu smislenost informacije. Paketi prolaze sve slojeve redom tijekom slanja, a obrnutim redom kada se paket prima. Internet protokol je zadužen za usmjeravanje paketa dok je TCP zadužen za pouzdan prijenos. [14]



Slika 3.3. TCP/IP referentni model

Uloge slojeva TCP/IP referentnog modela:

- **Sloj pristupa mreži:** Zaslužan za generiranje podataka i zahtijeva konekcije.
- **Mrežni sloj:** Odabire i upućuje pakete kako bi što brže došli do željene destinacije.
- **Transportni sloj:** Pruža stabilnost kod slanja i uklanja pogreške.
- **Aplikacijski sloj:** Sadrži funkcije sloja sjednice i prezentacijskog sloja OSI modela.

Oba modela koriste tehnologiju zvanu komutacija paketa (engl. *Packet-switching*) koja opisuje slanje podataka u malim jedinicama zvanim paket. Paketi se usmjeravaju po mreži koristeći odredišnu adresu koja je sadržana u samom paketu. Bitno je da svi paketi stignu na odredište bez obzira na to kojim putem su došli. Tehnologija omogućava da iste komunikacijske linije dijele veći broj korisnika. [12]

3.3. IEC 61850 standard

Razvojem tehnologija sve više se pojavljuje digitalizacija i predviđeno je da će gotovo sve sklopke, rasvjete i mnogi drugi električni uređaji imati mogućnost upravljanja i nadzora digitalnim putem. Upravo ta potreba za upravljanjem većom količinom uređaja i njihovom međusobnom komunikacijom dovela je do razvoja novog standarda. IEC 61850 je standard za komunikacijske mreže i sustave za automatizaciju. Zaslužan je za pružanje komunikacije u stvarnom vremenu, zaštitu, kontrolu, mjerenja i nadzor svih automatiziranih dijelova postrojenja. Pruža

kompatibilnost između opreme različitih proizvođača, smanjuje troškove, olakšava procese pripreme i održavanja i ono što je važno za budućnost, otvoren je prema novim tehnologijama što daje mogućnost napretka. [15]

3.4. IEEE 1711.2-2019 standard za sigurnost SCADA komunikacijskih protokola

IEEE 1711.2-2019 je standard koji pruža integritet unutar SCADA sustava zajedno sa cyber zaštitom. Ne obuhvaća detalje oko aplikacija i fizičkog povezivanja nego mu je primarni posao zaštita. Primarno je dizajniran za zaštitu serijske komunikacije unutar SCADA sustava, ali se može primijeniti i u novijim tehnologijama poput optičkih vlakna, naponskih vodovi, radio veza i telefonskih linija. Standard definira protokol za sigurnost SCADA sustava (engl. *Secure SCADA Communications Protocol* - SSCP) koji je zadužen za očuvanje integriteta unutar SCADA sustava te je od ključne važnosti i ukoliko bi netko imao neovlašten pristup mogle bi nastati ogromne štete.[16]

3.5. IEEE 802 standard

3.5.1. IEE 802.3 standard

IEEE 802.3 je standard za lokalne mreže pod nazivom Ethernet. Postoji klasični Ethernet sa topologijom dijeljenog medija koji dostiže brzine do 10 Mbit/s i komutirani Ethernet u kojem se za povezivanje stanica koristi uređaj koji se naziva komutator ili preklopnik. Komutirani Ethernet dostiže puno veće brzine prijenosa podataka u odnosu na klasični Ethernet. Struktura Ethernet okvira podijeljena je na preambulu, MAC adresa odredišta, MAC adresa izvora, duljina okvira, zatim slijede podaci i ako je potrebno dopuna i na kraju kontrolna suma koja predstavlja zaštitu okvira. Preambula označava početak okvira i kod IEE 802.3 to je niz 10101011.

3.5.2. IEE 802.11 standard

IEEE 802.11 predstavlja standard za bežične lokalne mreže. Klijenti međusobno komuniciraju preko pristupne točke koja je također povezana sa drugim mrežama. Sve tehnike koje se koriste unutar IEEE 802.11 mreža temelje se na radio prijenosu kratkog dometa na frekvencijama 2.4 GHz i 5 GHz. Frekvencijsko područje od 5 GHz je kraćeg dometa, ali je manje opterećeno (puno veći broj uređaja radi na 2.4 GHz).

Struktura okvira kod IEEE 802.11 standarda:

- Kontrolno polje koje sadrži 11 podpolja:
 - Verzija protokola
 - Tip okvira i podtip okvira
 - Za distribucijski sustav i od distribucijskog sustava – označavaju putuje li okvir na mrežu s pristupnom točkom ili iz nje
 - Dodatni fragmenti
 - Upravljanje energijom – označava prelazak u način rada s uštedom energije
 - Dodatni podaci
 - Zaštitni okvir – ukazuje da je okvir zaštićen enkripcijom
 - Redoslijed
- Polje koje govori koliko će dugo podatkovni okvir zauzimati kanal
- Tri adresna polja – adresa odredišta, adresa izvora i adresa pristupne točke
- Polje sekvence služi za numeriranje okvira kako bi se izbjeglo njihovo dupliciranje
- Polje podataka
- Zaštitno polje

4. PROTOKOLI ZA KOMUNIKACIJU U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

Protokol je skup pravila za oblikovanje i obradu podataka. Mrežni protokoli su poput zajedničkog jezika za računala. Računala unutar mreže mogu koristiti vrlo različit softver i hardver; međutim, korištenje protokola omogućuje im međusobnu komunikaciju bez obzira na te razlike.

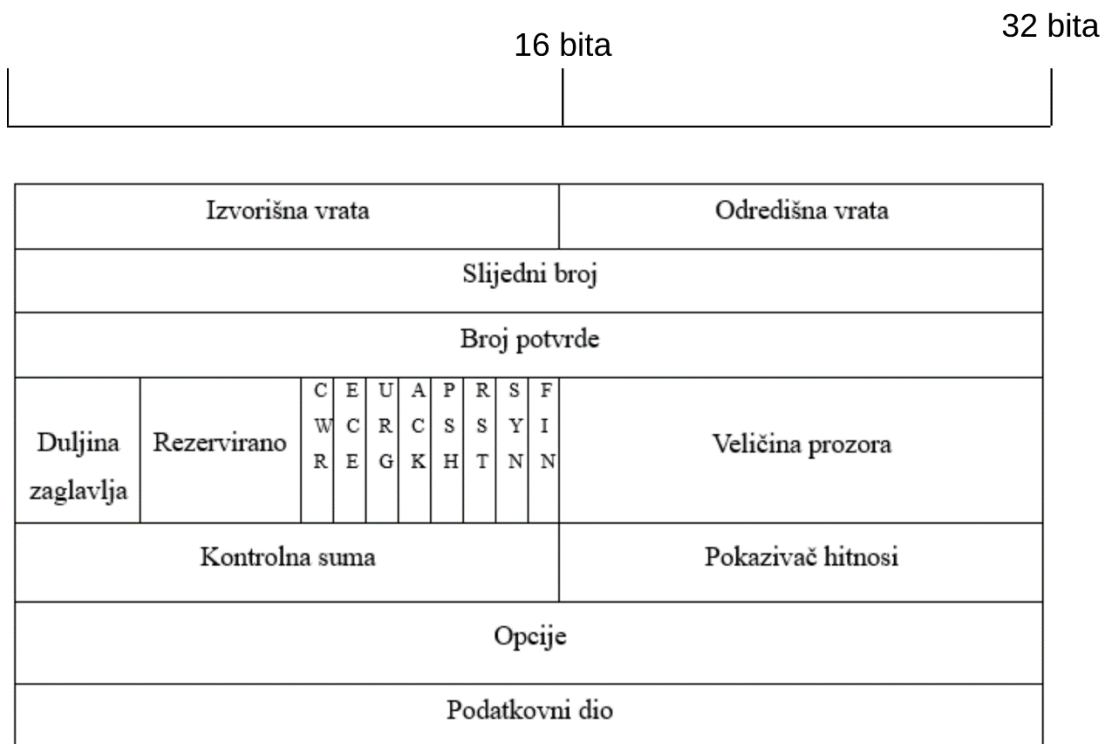
4.1. TCP protokol

TCP protokol osigurava pouzdanu isporuku podataka od izvora do odredišta. Osigurava pouzdan transport s kraja na kraj zahvaljujući mehanizmima potvrde i ponovnog slanja uz očuvanje redoslijeda i upravljanje transportnom vezom. Logička veza između procesa definirana je pomoću para 16-bitnih transportnih adresa, koja se najčešće nazivaju vrata (engl . *port*). Pruža dvosmjerni transport kontinuiranog niza podatka pakiranjem okteta podataka u segmente koji se potom predaju protokolu mrežnog sloja. Više procesa na istom računalu može istovremeno koristiti TCP uporabom dodatne adresne informacije (broj vrata) koji jednoznačno određuje aplikaciju. TCP ima sposobnost oporavka od gubitaka, udvostručenja, pogreška u struji okteta i pogrešnog redoslijeda.

TCP zaglavlje sadrži sljedeća polja:

- Izvorišna vrata (16 bita) - broj vrata pošiljatelja na izvorišnoj strani.
- Odredišna vrata (16 bita) - broj vrata primatelja na odredišnoj strani.
- Slijedni broj (32 bita) - redni broj okteta koji je prvi u segmentu.
- Broj potvrde (32 bita) – broj sljedećeg okteta kojeg primatelj treba primiti.
- Duljina zaglavlja (4 bita) – broj 32-bitnih riječi sadržanih u zaglavlju.
- Rezervirano (4 bita) – ne koristi se već je rezervirano za buduće potrebe.
- Zastavice (8 bita) – upravljački bitovi za potvrdu i upravljanje transportnom vezom.
 - CWR – zastavica pomoću koje pošiljatelj signalizira primatelju da je smanjio veličinu prozora (slučaj kada nastaje zagušenje)
 - ECE – signalizira pošiljatelju da je došlo do zagušenja
 - URG – označava prioritetne podatke
 - ACK – postavlja se u 1 kada je broj potvrde valjan

- PSH – od prijemnika se zahtijeva da podatke ne pohranjuje u međuspremnik (engl. *buffer*) već da ih odmah prosljedi aplikaciji
- RST – zastavica za resetiranje konekcije koje je poremećena
- SYN – koristi se za uspostavu konekcije
- FIN – koristi se za oslobađanje konekcije
- Veličina prozora (16 bita) – najveći dopušteni broj okteta koje predajnik smije poslati prije prijema potvrde.
- Kontrolna suma (16 bita) – zaštitni kod za otkrivanje pogrešaka u zaglavlju.
- Pokazivač hitnosti (16 bita) – pokazivač na podatke koje zahtijevaju hitnu obradu.
- Opcije (nijedna ili više 32-bitnih riječi) – polje za realizaciju nekih posebnih mogućnosti.
- Podatkovni dio – podaci aplikacijskog sloja.[17]



Slika 4.1. Format TCP zaglavlja [17]

4.2. UDP protokol

Protokol izmjene korisničkih datagrama (engl. *User Datagram Protocol* - UDP) pruža bežičnu uslugu prijenosa podataka putem Interneta. Za razliku od TCP-a ne pruža pouzdan prijenos paketa već se za pouzdanost brine sama aplikacija ako je to potrebno. UDP paketi nisu numerirani, a zaštitna suma nije obavezna, tako da se ne provjerava je li došlo do pogreške tijekom prijenosa paketa.

UDP zaglavlje čine sljedeća polja:

- Izvorišna vrata (16 bita) - broj vrata pošiljatelja na izvorišnoj strani.
- Odredišna vrata (16 bita) - broj vrata primatelja na odredišnoj strani.
- UDP duljina (16 bita) – duljina UDP paketa
- UDP kontrolna suma (16 bita) – zaštitna suma (nije obavezna)[18]

4.3. Distributed Network Protocol 3 - DNP3

Protokol distribuirane mreže (engl. *Distributed Network Protocol 3* – DNP3) je protokol osmišljen za daljinsko upravljanje energetske sustavima. Primarno je korišten u Sjedinjenim Američkim Državama, ali se primjenjuje i u drugim dijelovima svijeta. U Europi je prevladao noviji IEC 61850 standard, ali zbog visoke primjene sve više organizacija koristi kombinaciju DNP3 protokola i IEC 61850 standarda. DNP3 definira pravila kojima dva računala međusobno komuniciraju i oslanja se na bežičnu vezu. Prenosi male količine podataka sa velikim očuvanjem integriteta i zaštite. Komunikacija se temelji na glavni-podređeni principu tako da je glavno računalo u kontrolnom centru snažnije te pohranjuje, obrađuje i prezentira sve podatke. Podređeni je u ovom slučaju računalo postavljeno na terenu koje prikuplja podatke sa raznih mjernih uređaja kao što su brojila i senzori. Podaci koje podređeni uređaj prikupi šalju se glavnom računalu koji ih dalje obrađuje. Unutar protokola također su definirane varijable podataka i tipovi podataka s obzirom na stanja mjerenja. Računala komuniciraju unutar ograničenog frekvencijskog pojasa što omogućava serijsku vezu, radio komunikaciju i komunikaciju putem postojeće internetske mreže koristeći TCP/IP ili UDP.[19]

4.4. Modbus protokol

Modbus je industrijski protokol razvijen 1979. godine za komunikaciju uređaja i naprava u automatizaciji. Na početku je bio namijenjen kao protokol u aplikacijskom sloju za komunikaciju serijskim putem, ali s vremenom se proširio i na TCP/IP i UDP. Komunikacija se odvija na principu glavni – podređeni. U ovom slučaju glavni uređaj predstavlja SCADA sustav, a podređeni uređaj je senzor ili PLC. Glavna veličina je PDU, koja definira funkcijske kodove i sve potrebne podatke za kontrolu. Svaki funkcijski kod ima specifičnu ulogu koji podređeni uređaj ovisno o svojoj primjeni može implementirati. Podaci koje se šalju uz funkcijski kod pružaju obveznu dopunu kako bi podređeni uređaj znao što točno izvršiti npr. funkcijski kod je zadužen da pročita vrijednost registra, ali to ne može učiniti bez dodatnih podataka o tome od kojeg registra početi i koliko njih treba pročitati. Ako podređeni uređaj napravi normalan odgovor, funkcijski kod u odazivu je odjek funkcije koda u zahtjevu. Podatkovni bitovi tada sadržavaju informacije koje je podređeni uređaj prikupio. U slučaju nastupanja pogreške funkcijski kod se prilagodi tako da je odgovor pogrešan i podatkovni bitovi tada sadržavaju informacije koje opisuju pogrešku. Zato postoji zastavica pogreške koja dopušta glavnom uređaju da potvrdi da su primljeni podaci ispravni. [20]

4.5. GOOSE protokol

Generički objektno orijentirani događaj transformatorske stanice (engl. *Generic Object Oriented Substation Event* – GOOSE) je protokol definiran unutar IEC 61850 standarda. Koristeći pouzdane i brze mehanizme za grupaciju tipova podataka u podatkovne skupine omogućuje slanje tih podataka kroz komunikacijsku mrežu brzinama do 4 milisekunde. Glavne značajke su mu velike brzine prijenosa poruka i pouzdanost, a najviše se koristi za razmjenu podataka između pametnih elektroničkih uređaja (engl. *Intelligent Electronic Device* - IED) putem Ethernet. Koristi virtualne lokalne mreže (engl. *Virtual Local Area Network* - VLAN) i tehnike prioriteta da podijeli mrežu u nekoliko virtualnih mreža i tako postavi listu prioriteta koja omogućuje brži prijenos. Komunikacije se temelji na izdavač – pretplatnik (engl. *publisher – subscriber*) metodi tako da izdavač povremeno šalje poruku i kad se dogodi neka promjena (npr. stanje sklopke se promijenilo) pošalje nekoliko drugih poruka sa novim podacima. Manjkavost ovog načina je to što ne postoji informacija o tome je li pretplatnik primio poruku, stoga se poruka ponovo šalje kako bi se spriječilo gubljenje podataka i kako bi se obavijestili spojeni uređaji o trenutnom stanju. [21]

4.6. OPC UA protokol

Ujedinjena arhitektura otvorene platforme za komunikaciju (engl. *Open Platform Communications Unified Architecture* - OPC UA) je komunikacijski protokol namijenjen za komunikaciju između dva uređaja u automatiziranom postrojenju. Nezavisan je o platformama na kojim djeluje i kompatibilan je sa raznim uređajima i programima, a najpoznatiji su Windows i Linux. Pogodan je za korištenje u malim uređajima, ali i unutar velikih postrojenja. Podržava izdavač – pretplatnik komunikacijski model, ali i korisnik – server model. Koristi se za nadzor i kontrolu industrijskih procesa, u izgradnji automatskih sustava, za optimizaciju i kontrolu električne energije i njezine distribucije te u zdravstvenim sustavima. Glavne prednosti su mu dizajn namijenjen da podržava buduća tehnološka dostignuća, smanjenu potrošnju prilikom integracije tako što pruža ujedinjenu komunikacijsku platformu te njegov pristup podacima sustava u stvarnom vremenu i analiza tih podataka koja povećava efikasnost samog sustava. [22]

4.7. MMS Protocol

Specifikacija proizvodne poruke (engl. *Manufacturing Message Specifcaion* – MMS) je protokol koji opisuje komunikaciju između IED-ova i RTU-ova. RTU je elektronski uređaj upravljan mikro procesorom koji prikuplja podatke dobivene iz fizičkog svijeta i šalje ih glavnom sustavu (često korišten u SCADA sustavima). definira zajednički jezik kako bi prikazao informaciju unutar podsustava. Protokol također nudi algoritme za digitalne potpise, enkripciju i druge sustave obrane kako bi zaštitio sustav od neovlaštenog pristupa.[23] Protokol je vrlo fleksibilan i može se prilagoditi različitim industrijskim potrebama, omogućuje proširivost sustava.

5. SIGURNOST KOMUNIKACIJE U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

U današnje vrijeme pristup internetu omogućen je gotovo cijelom svijetu i svatko može doći do raznih informacija u kratkom roku. Tako sa razvojem pametnih mreža i novih tehnologija koje omogućuju upravljanje energetske sustavima sa udaljenih mjesta dolazi potreba za razvojem sigurnosnih sustava kako bi se spriječili cyber napadi, krađa podataka i druge nepogodnosti. Elektroenergetski sustavi od znatne su važnosti za svakodnevicu čovjeka i stalan rad mora biti osiguran. U slučaju napada elektroenergetskih sustava može doći do prekida opskrbe električnom energijom, gubitka podataka, financijskih gubitaka, oštećenja opreme unutar sustava, a u najgorem slučaju i do ozljeda radnika. Najveći rizik imaju SCADA sustavi zbog njihove velike uporabe i bitne uloge u opskrbi električnom energijom. Postoje mnoge prijetnje za elektroenergetske sustave i napadači postaju sve kreativniji. Zlonamjerni softver može naštetiti radu elektroenergetskih sustava tako da onemogući pristup, isključi sustav, ometa rad sustava, uzima podatke. Uz sve to dodatno napadač može tražiti otkupninu u zamjenu za normalan rad sustava. Pristup ne mora uvijek biti neovlašten pa tako i netko sa ovlaštenim pristupom sustavu može neprimjetno ukrasti bitne informacije i širiti ih izvan kruga povjerenja ili može namjerno sabotirati rad sustava. No nisu samo cyber napadi opasni za narušavanje rada sustave već može doći i do fizičkih provala, krađe i oštećenja električnih kablova i imovine.

Primjeri napada na elektroenergetske sustave:

- *Operation Aurora* (2009) bio je masovni organizirani slijed napada na razne industrije pa tako i na elektroenergetske sustave.
- Napad trafostanice u San Franciscu (2013) u kojem su prerezani energetske kablovi i optička vlakna
- Napad elektroenergetske mreže u Ukrajini (2015 i 2016) kada su hakeri uspjeli ući u mrežu i uzrokovali veliki broj nestanka električne energije diljem zemlje. Ovaj incident je bio važna točka u otkrivanju slabosti elektroenergetskih sustava na cyber napade.

Kako bi se napadi spriječili potrebno je implementirati sigurnosne mjere i zaštite u cijelom sustavu. Postoje dobro poznati standardi koji se mogu primijeniti u zaštiti od cyber napada. Važno je osigurati da su svi uređaji adekvatno zaštićeni sa vatrozidom i antivirusnim programima. Potrebno je koristiti i kontrolirati ograničen pristup. Kamere su obavezan dio zaštite imovine jer one omogućuju pregled aktivnosti unutar cijelog poduzeća. Za razmjenu podataka preporučuje se

enkripcija podataka jer su na taj način podaci sakriveni od neovlaštenog pregleda. Redovita ažuriranja sustava za obranu su obavezna jer se na taj način osigurava obrana od najnovijih prijetnji. Dodatno pomaže obrazovanje osoblja tako da mogu prepoznati, ograničiti i onemogućiti napad, ali i vratiti sustav u normalu nakon napada.

Postoji nekoliko standarda koji pružaju zaštitu elektroenergetskih sustava. ISO/IEC 27019 pruža smjernice za sigurnu implementaciju i upravljanje informacijama unutar energetskeg sustava, a to uključuje i generiranje energije, prijenos i distribuciju. Europski mrežni kodeks (egl. *European Network Codes* - ENC) definira pravila i standarde za operacije, upravljanje i razvoj Europskih električnih mreža. ISO 27001 je nacionalni standard koji pruža sistematski pristup upravljanju informacija koje su pod rizikom od napada. Također pruža upute za upravljanje rizicima, kako reagirati na određene incidente i moguća poboljšanja. Unutar DNP3 protokola koristi se enkripcija za zaštitu od neovlaštenog pristupa podacima tako da su svi uređaji za komunikaciju povezani TCP/IP kanalima koriste enkripciju koju samo oni mogu čitati.

6. BUDUĆNOST KOMUNIKACIJA U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

Sa napretkom tehnologije u elektroenergetskim sustavima dolazi se do novih inovacija i poboljšanja, razvijaju se nove tehnologije i usavršuju stare. Sve češće se prelazi sa starih modela elektroenergetskih mreža na pametne mreže (engl. *smart grid*). Nove tehnologije se razvijaju kako bi se povećala efikasnost, sigurnost, ekonomičnost i prilagodljivost električne energije. Nove tehnologije sve su više usmjerene prema obnovljivim izvorima energije kao što su sunčeva energija, energija vjetra, geotermalna energija i hidroenergija. U zadnjih nekoliko godina se to može primijetiti povećanim brojem solarnih panela, vjetroelektrana, ali i dizalica topline koje se kombiniraju sa pametnim tehnologijama kako bi njihova efikasnost bila što veća. Kako bi se uštedili materijali potrebni za izradu kablova, sve češće se koristi bežična komunikacija. Bežična komunikacija omogućuje fleksibilan i mobilan rad, jednostavno se instalira i ne zahtjeva dodatne troškove kao što su rušenje zidova ili postavljanje kanalica za kablove. Sigurnost ljudi i radnika je također bitna te se sve više koristi automatizacija pogona ili upravljanje pogona sa sigurne udaljenosti kako bi se smanjio broj ozljeda na radu, time se postiže i veća efikasnost energije. Većina „starih“ tehnologija je kompatibilna sa novima jer se njihova primjena nije uklonila već unaprijedila. Isto tako nove tehnologije rade se tako da budu dugovječne i pogodne za daljnji razvoj. Umjetna inteligencija sve se češće koristi u novim tehnologijama, omogućuje im automatsko učenje i prilagođavanje promjenama u okolini te povećava efikasnost. Razvoj virtualne realnosti mogao bi imati ključnu ulogu u učenju i udaljenoj suradnji jer bi se omogućilo interaktivnije iskustvo bez potrebe za korištenjem pravih resursa. Jedan od novih sistema je *Starlink* koji omogućuje globalnu pokrivenost brzim internetom. U razvoju je i 6G mreža koja se očekuje 2030. godine za koju se predviđaju brzine i do terabit po sekundi, niska latencija i podrška za aplikacije koje zahtijevaju ogromnu količinu podataka i brze reakcije izvođenja operacija nad tim podacima. Nove inovacije će pružati nove načine komunikacije, načine na koji živimo i radimo, ali i otvoriti i nove mogućnosti.

7. ZAKLJUČAK

Razvoj komunikacijskih tehnologija u elektroenergetskim sustavima omogućava dinamičko upravljanje potrošnjom i proizvodnjom energije, poboljšano upravljanje skladištenjem energije te automatizaciju industrijskih pogona. Ove nove tehnologije omogućuju bržu razmjenu informacija unutar elektroenergetskog sustava, što rezultira bržom obradom i prikazom podataka.

Digitalizacija i automatizacija elektroenergetskih sustava olakšavaju dijagnostiku kvarova i održavanje, smanjujući pritom gubitke u prijenosu energije. Pametne mreže, integrirajući obnovljive izvore energije, koriste nove tehnologije s ciljem postizanja maksimalne efikasnosti.

Osim toga, komunikacijski standardi i protokoli osiguravaju sinkronizaciju uređaja različitih proizvođača, omogućuju razmjenu podataka u stvarnom vremenu te olakšavaju integraciju novih tehnologija. Ovi standardi također uključuju sigurnosne mehanizme neophodne za zaštitu od potencijalnih napada.

Zaštita elektroenergetskih sustava ima ključnu ulogu, s obzirom na to da napadi na ove sustave mogu dovesti do prekida opskrbe električnom energijom, ugroziti ljudske živote ili prouzročiti značajnu materijalnu štetu. U tom kontekstu, umjetna inteligencija predstavlja tehnologiju koja bi mogla unaprijediti upravljanje elektroenergetskim sustavima. Međutim, kako bi se ostvario puni potencijal umjetne inteligencije u ovom području, potrebno je dalje razvijati njene mogućnosti.

LITERATURA

- [1] H. Jack, Automating Manufacturing Systems with PLCs, 2008.
- [2] J. Slazar, Wireless Networks, Czech Technical University of Prague Faculty of electrical engineering, 2017.
- [3] J.M. Senior, Optical Fiber Communications, Principles and Practice, 2009.
- [4] D. M. Pozar, Microwave engineering, Fourth Edition, University of Massachusetts at Amherst, 2012.
- [5] The astrology page [online], dostupno na: <https://hr.theastrologypage.com/satellite-communications> [21.5.2024.]
- [6] Scada-international, What is SCADA? [online], dostupno na: <https://scada-international.com/what-is-scada/> [21.5.2024.]
- [7] gridX, Energy Management System [online], 2024, dostupno na: <https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-an-energy-management-system> [22.5.2024.]
- [8] IBM, Advanced metering infrastructure [online], 2022, dostupno na: <https://www.ibm.com/topics/advanced-metering-infrastructure> [31.5.2024.]
- [9] IEEE.org, IEEE SA [online], dostupno na: <https://standards.ieee.org/about/> [6.6.2024.]
- [10] IEC [online], dostupno na: <https://www.iec.ch/homepage> [6.6.2024.]
- [11] NIST [online], dostupno na: <https://www.nist.gov> [6.6.2024.]
- [12] sys.portal, CARNET, Računalne mreže – OSI referentni model [online], dostupno na: <https://sysportal.carnet.hr/node/352> [30.8.2024]
- [13] CCNA, OSI layers/ Peer-to-peer communications/ TCP/IP model [online], 2009, dostupno na: <https://basicitnetworking.blogspot.com/2009/11/osi-layers-peer-to-peer-communications.html> [1.9.2024]
- [14] GeeksforGeeks, TCP/IP model [online], 2024, dostupno na: <https://www.geeksforgeeks.org/tcp-ip-model/> [1.9.2024]
- [15] SGRwin, Basic understanding of IEC 61850 [online], 2024, dostupno na: <https://www.sgrwin.com/basic-understanding-iec-61850/> [6.6.2024.]

- [16] IEEE.org, IEEE SA [online], dostupno na: <https://standards.ieee.org/ieee/1711.2/5714/> [21.6.2024.]
- [17] E.Mujarić, layer-x [online], dostupno na: <http://mreze.layer-x.com/s040100-0.html> [28.8.2024.]
- [18] E.Mujarić, layer-x [online], dostupno na: <http://mreze.layer-x.com/s040200-0.html> [28.8.2024.]
- [19] Copadata, DNP3 protocol and IEC 61850 [online], dostupno na: <https://www.copadata.com/en/industries/energy-infrastructure/energy-insights/dnp3-distributed-network-protocol/> [21.6.2024.]
- [20] NI, Modbus Protocol in Depth [online], 2024, dostupno na: <https://www.ni.com/en/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/the-modbus-protocol-in-depth.html> [22.6.2024.]
- [21] Igrid-td, IEC 61850 GOOSE Communication [online], dostupno na: <https://www.igrid-td.com/smartguide/iec61850/goose-messaging/> [22.6.2024.]
- [22] SoftwareAG, OPC UA integration [online], dostupno na: https://www.softwareag.com/en_corporate/resources/iot/article/opc-ua.html [6.7.2024.]
- [23] SGRwin, The Roles of GOOSE, MMS, and SV Protocols in Digital Substations [online], 2023, dostupno na: <https://www.sgrwin.com/goose-mms-and-sv-protocols/> [9.8.2024.]

SAŽETAK

Ovaj završni rad opisuje tehnologije, standarde i protokole koji se koriste za komunikaciju u elektroenergetskim sustavima. Navedene su i opisane tehnologije i sustavi za nadzor, kontrolu i komunikaciju unutar elektroenergetskih sustava. Opširnije je napisano kako pojedina tehnologija radi pa su zatim opisani standardi i protokoli korišteni unutar elektroenergetskih sustava. Opisani su standardi koji predstavljaju temelje za izgradnju različitih vrsta tehnologija. Navedeni su i opisani protokoli koji opisuju komunikaciju između različitih uređaja i mreža. Sve zajedno čini cjelinu koja ima veliku ulogu u današnjem opskrbljivanju električnom energijom i razmjeni informacijama. Peta cjelina govori o prijetnjama za elektroenergetske sustave i kako ih zaštititi. Posljednja cjelina predviđa kako bi se komunikacije mogle razvijati u budućnosti. Tehnologije za komunikaciju postale su svakodnevice čovjeka iako toga nekad nismo svjesni, ali gotovo svaki dio našeg života koristi ove tehnologije, a to uključuje zdravstvene sustave, opskrbu energijom, online komunikaciju, školovanje i mnoge druge dijelove života.

Ključne riječi: komunikacija, mreže, protokoli, standardi, tehnologije

SUMMARY

This thesis describes the technologies, standards, and protocols used for communication in power systems. It outlines and describes the technologies and systems for monitoring, control, and communication within power systems. A detailed explanation of how each technology operates is provided, followed by a description of the standards and protocols used within power systems. The standards that serve as the foundation for building various types of technologies are described. The protocols that define communication between different devices and networks are also listed and explained. Together, they form a cohesive unit that plays a significant role in today's electricity supply and information exchange. Fifth section discusses the threats to power systems and how to protect them. The final section forecasts how communications might evolve in the future. Communication technologies have become a part of everyday life, even though we may not always be aware of it, but almost every aspect of our lives utilizes these technologies, including healthcare systems, energy supply, online communication, education, and many other areas of life.

Keywords: communication, networks, protocols, standards, technologies