

# Pregled komunikacijskih sustava u pametnim elektroenergetskim mrežama

---

**Skelo, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*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:200:457022>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**

*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 studij**

**PREGLED KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA U  
PAMETNIM ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA**

**Završni rad**

**Matija Skelo**

**Osijek, 2017.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 10.07.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada**

Ime i prezime studenta:	Matija Skelo
Studij, smjer:	Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3958, 18.07.2014.
OIB studenta:	27552862552
Mentor:	Doc.dr.sc. Mario Vranješ
Sumentor:	Dr.sc. Denis Vranješ
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Pregled komunikacijskih sustava u pametnim elektroenergetskim mrežama
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Predložena ocjena završnog rada:	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	10.07.2017.
Datum potvrde ocjene Odbora:	27.07.2017.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

Osijek, 10.07.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Matija Skelo

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

3958, 18.07.2014.

**Ephorus podudaranje [%]:**

1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pregled komunikacijskih sustava u pametnim elektroenergetskim mrežama**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Mario Vranješ

i sumentora Dr.sc. Denis Vranješ

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 studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. PAMETNE MREŽE .....	2
2.1. Glavne primjene pametnih mreža.....	3
2.2. Razlog korištenja pametnih mreža .....	5
2.3. Vizija i način funkcioniranja pametne mreže .....	6
3. KOMUNIKACIJA PAMETNE MREŽE.....	8
3.1. Okvir za pametnu mrežu usmjeren na komunikaciju .....	11
3.1.1. Operativna mreža .....	15
3.1.2. Poslovna mreža .....	16
3.1.3. Potrošačka mreža.....	17
3.2. Uvjeti komunikacije .....	18
3.3. Zahtjevi za sigurnost i privatnost.....	18
4. KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI.....	22
4.1. Standardi za upravljanje podacima.....	26
4.1.1. Sigurnost informacija .....	28
4.2. Digitalni komunikacijski protokoli.....	30
4.3. Standardna serija IEC 61850 .....	34
4.3.1. Struktura komunikacijske usluge .....	37
4.4. Referentni model IEC/TR 62357.....	38
5. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA.....	41
POPIS I OPIS UPOTRIJEBLJENIH KRATICA.....	44
SAŽETAK.....	46
ŽIVOTOPIS .....	48

# 1. UVOD

Europska tehnologijska platforma bavi se električnim mrežama koje mogu inteligentno integrirati sve aktivnosti korisnika priključenih na mrežu, a 2006. godine pokrenula je i razvitak pametnih mreža (ili *Smart Grid*), ključnih komponenti u polju obnovljivih izvora energije, tj. jednih od temeljnih stupova na kojima počiva ideja obnovljivih izvora energije. Današnjim tempom ekonomskog razvoja i gospodarskog rasta do izražaja sve više dolazi energija i potreba za njom, a upravo je energija ključan faktor u ostvarenju ekonomskih i gospodarskih ciljeva. U narednim je godinama glavni cilj, uz uvođenje napredne elektroenergetske mreže, povezivanje takve mreže s obnovljivim izvorima energije. U prvom poglavlju ovog završnog rada govorit će se na koji način pametne mreže funkcioniraju i koje su prednosti njihova korištenja. Zatim slijedi razrada teme, gdje će najprije biti riječ o komunikacijskom dijelu pametne mreže, tj. o načinima njezina komuniciranja, uz objašnjenje svakog navedenog načina, dok posljednje poglavlje govori o komunikacijskim sustavima, gdje će biti opisani različiti sustavi te će biti navedeno zašto se koriste, uz poseban naglasak o njihovim prednostima i nedostacima.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak je završnog rada dati pregled komunikacijskih sustava u pametnim elektroenergetskim mrežama, dok je cilj na temelju pregleda različitih komunikacijskih sustava utvrditi njihove prednosti i nedostatke. Potrebno je i opisati načine komunikacije unutar pametne elektroenergetske mreže, analizirati utjecaje različitih parametara na performanse komunikacijskih sustava te cjelokupan sadržaj popratiti slikama i shemama.

## 2. PAMETNE MREŽE

Europska skupina stručnjaka u okviru tehnološke platforme *Smart Grids* razvila je između 2005. i 2008. godine viziju za električne mreže budućnosti, a kao rezultat objavljena su tri osnovna dokumenta. Dokumenti su Zajednička vizija (eng. *Common Vision*), Strateško istraživanje (eng. *Strategic research agenda*) i Strateški dokument o implementaciji (eng. *Strategic deployment document*) [1]. Nabrojani dokumenti nalaze se na slici 2.1.



**Slika 2.1.** Osnovni dokumenti Europskog savjetodavnog vijeća

Definicija pojma pametne mreže nalazi se u Strateškom dokumentu o implementaciji (eng. *Strategic deployment document*) [2]. Pametna mreža elektroenergetska je mreža koja inteligentno može integrirati akcije svih korisnika koji su priključeni na nju, od generatora i potrošača pa do onih koji rade oboje kako bi se učinkovito pružile održive, ekonomske i sigurne zalihe električne energije. Skup tehnologija koji omogućava bolju integraciju obnovljivih izvora u elektroenergetsku mrežu, a uvodi novu tehnologiju koja omogućuje mreži funkcioniranje na drugačiji, precizniji i stabilniji način, naziva se pametnom mrežom [3]. Pametne mreže omogućuju razvoj novih usluga i servisa, kao što je npr. elektrifikacija cestovnog transporta [4], dok današnje električne mreže koriste zastarjele tehnologije. Takve tradicionalne mreže obično se sastoje od centraliziranih elektrana, prijenosnih i distribucijskih linija te su jednosmjerni i ovise o fosilnim gorivima [5]. Međutim, te zastarjele mreže susreću se s brojnim izazovima, uključujući probleme s kontinuiranim rastom potražnje i potrebom za integracijom mnogih

obnovljivih izvora energije, što može uključivati povremenu dostupnost i potrebu za poboljšanjem sigurnosti opskrbe [6]. Pametne mreže imaju sposobnost upravljanja dvosmjernim protokom električne energije i informacijama kako bi optimizirale opskrbu i potražnju, dok tradicionalne električne mreže imaju jednosmjernu komunikaciju između komunalnih usluga i kupaca, odnosno imaju jednosmjerni tok informacija od korisnika do mreže i jednosmjerni tok energije od mreže do korisnika. Također, pametne mreže integriraju niz sučelja, uključujući sustave upravljanja kućnim energijama (*eng. Home energy management systems - HEMS*), izgradnju sustava za upravljanje energijom (*eng. Building energy management systems - BEMS*) i naprednu mjeriteljsku infrastrukturu (*eng. Advanced metering infrastructure - AMI*) [7]. Pametne mreže mogu koordinirati potrebe i sposobnosti različitih proizvođača, mrežnih operatera, krajnjih korisnika i sudionika na tržištu električne energije za učinkovito upravljanje svim dijelovima sustava. Sve te komponente zahtijevaju integraciju pametnih mreža kako bi se postigle značajne koristi i ekonomičnost [6]. Pametne mreže koriste se da bi se ostvario cilj u prikupljanju informacija o ponudi i potrošnji električne energije, a upravo su poboljšanje pouzdanosti, efikasnosti, održivosti i ekonomičnosti proizvodnje te distribucije električne energije glavni ciljevi pametnih mreža.

## 2.1. Glavne primjene pametnih mreža

Pametne mreže složeni su sustavi, a njihove glavne primjene jesu:

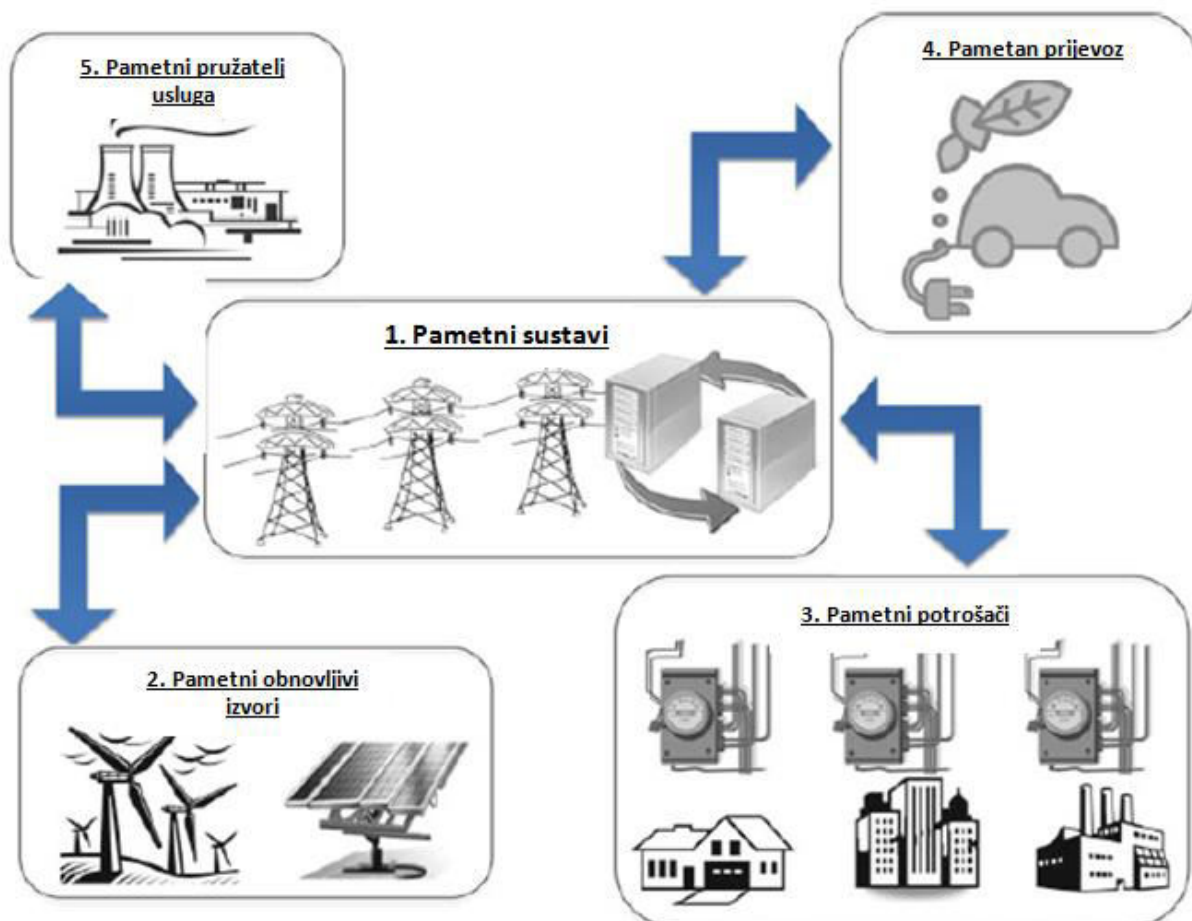
- Pametni sustavi: pametne mreže mogu poboljšati otpornost na poremećaje, napade i prirodne katastrofe [8]. To se može postići naprednim sensorima i računalnim daljinskim upravljačima. Ove sofisticirane komunikacijske tehnologije i automatizacija mogu spriječiti poremećaje i time ograničiti prekide i gubitke na mreži [9]. Također, pametne mreže mogu brže identificirati i riješiti problem [10].
- Pametni obnovljivi izvori energije: današnje mreže uglavnom su namijenjene centraliziranim izvorima opskrbe i zbog toga su manje prihvatljive za povremene i široko raspodijeljene obnovljive izvore [8]. Pametne mreže mogu opskrbiti razne proizvodnje, uključujući obnovljive izvore energije kao što su vjetroelektrane i fotonaponske solarne energije [10]. Također, smatraju se neophodnima za uvođenje obnovljivih izvora energije jer se, primjerice, mogu razviti najsuvremeniji alati za modeliranje i podršku odlučivanja,



predviđanje vjetra i kontingencijske analize, a oni mogu poboljšati integraciju tih isprekidanih izvora u elektroenergetskom sustavu [6, 8].

- Pametni potrošači: u sustavima potrošači više nisu pasivni kupci [10]. Pametne mreže mogu informirati potrošače da proaktivno upravljaju svojom potrošnjom. Potrošačima se mogu osigurati uređaji i informacije za upravljanje potrošnjom energije te smanjenje potražnje kao odgovor na vršno opterećenje [10]. To se može postići pametnim brojilima i pametnim aparatima koji su povezani sa sensorima za prikupljanje podataka o potrošnji električne energije i koji su neophodni kako bi se omogućilo dinamičko određivanje cijena i sudjelovanje potrošača u upravljanju potražnjom [7].
- Pametan prijevoz: električno vozilo i plug-in hibridno električno vozilo mogu imati veliku ulogu u smanjenju emisija otrovnih plinova. Pametne mreže mogu bolje upravljati punjenjem vozila tako da, umjesto povećanja vršnih opterećenja, punjenje može biti strateško, ako je primjerice niska potrošnja električne energije ili kada je proizvodnja obnovljive električne energije visoka. Dugoročno, pametne mreže mogu koristiti električna vozila kao baterije za pohranu obnovljivih i drugih izvora električne energije za kasniju uporabu [8].
- Pametni pružatelji usluga: komunalna poduzeća neće biti jedini značajni sudionici na tržištima pametne mreže. Pametne mreže kreiraju nova tržišta jer su te tehnologije povezane s novim proizvodima i energetske uslugama, kao i novim tržištima. Energetska učinkovitost i inteligentni uređaji, pametni mjerni uređaji, novi senzorski i komunikacijski kapaciteti te osobna vozila predstavljaju primjere novih proizvoda [6]. Dakle, pametne mreže sklone su velikim promjenama na tržištu koje se oslanjaju na razne treće strane, uključujući pružatelje energetske usluga i trgovačkog posrednika za pružanje osnovnih i dodatnih usluga [10].

Na slici 2.2. prikazane su glavne primjene pametnih mreža.



Slika 2.2. Glavne primjene pametnih mreža [11, 12]

## 2.2. Razlog korištenja pametnih mreža

Pametne mreže upotrebljavaju inovativne proizvode i usluge zajedno s inteligentnim nadzorom, regulacijom, komunikacijom i tehnologijama samooporavljanja [2], kako bi:

- omogućile mreži da integrira korisnike s novim zahtjevima,
- poboljšale povezivanje i rad generatora svih veličina i tehnologija,
- povećale učinkovitost u mrežnim operacijama,
- omogućile potrošačima električne energije ulogu u optimiziranju sustava,
- pružile potrošačima više informacija i izbora za osiguravanje opskrbe električnom energijom,
- poboljšale funkcioniranje tržišta i usluge potrošača,
- značajno smanjile utjecaj ukupne opskrbe električnom energijom na okoliš,

- omogućile pojačane razine pouzdanosti, kvalitetu i sigurnost opskrbe.

Pametna mreža podržava uvođenje novih aplikacija s dalekodosežnim utjecajima, a to se odnosi na pružanje mogućnosti za sigurnu i kontroliranu integraciju više obnovljivih, naročito isparljivih izvora energije. Nadzor pruža mogućnosti samooporavljanja nakon kvarova i omogućuje potrošačima bolju informiranost o njihovoj potražnji za električnom energijom te aktivno sudjelovanje na tržištu električne energije [2].

### **2.3. Vizija i način funkcioniranja pametne mreže**

Pametne mreže najviše se temelje u odvažnim programima istraživanja, demonstracije i razvoja koji prikazuju pravce prema elektroenergetskoj mreži koja može učinkovito zadovoljiti buduće potrebe područja Europe.

Vizije pametnih mreža jesu [3]:

- omogućiti već postojećim mrežama da budu spremne prihvatiti nove energije iz svih energetske izvora i istovremeno brzo razviti stvaranje alata uz što manje troškove,
- uskladiti regulacijske i komercijalne okvire u Europi kako bi se olakšala prekogranična trgovina, tj. korištenje mrežnih servisa i energije te istodobno osiguravanje široke palete poslovanja,
- uspostaviti zajedničke protokole i tehničke standarde koji će osigurati otvoren pristup te time omogućiti razvoj opreme od bilo kojeg odabranog proizvođača,
- razviti informacije, računalne i telekomunikacijske sustave koji omogućuju tvrtkama da koriste inovativne usluge koje će dovesti do poboljšanja učinkovitosti i unaprjeđenja njihovih usluga,
- osigurati operativna sučelja novih i starih dizajnova mrežnih oprema kako bi se osigurala interoperabilnost automatizacije i kontrole.

Pametne mreže svoj nastanak temelje na informacijsko-komunikacijskim tehnologijama te zapravo predstavljaju samo nadogradnju na već postojeći sustav koji je baziran na ICT tehnologiji (*eng. Information and Communications Technology*). Također, u području razvoja i primjene pametnih mreža vrlo je bitna i interdisciplinarnost. Međutim, ljudi iz energetske grane u tehnologiji i dalje imaju

određene sumnje u pametne mreže i njihovo funkcioniranje u implementaciji postojećeg sustava [3]. Zbog tih sumnji postoje različiti komunikacijski sustavi te je dokazano da sustavi koji navode elektroenergetske mreže bazirane na informacijsko-komunikacijskoj tehnologiji mogu bez problema raditi 20 – 30 godina.

### 3. KOMUNIKACIJA PAMETNE MREŽE

Zbog povremene prirode te generacije i zahtjeva ravnoteže između proizvodnje i potrošnje u realnom vremenu, povećana proizvodnja obnovljivih izvora energije može prouzročiti nestabilnost u mreži električne energije. Pametna mreža pokušaj je implementacije informacijskih i komunikacijskih tehnologija (ICT) na energetska mrežu radi rješavanja problema nestabilnosti. Također, pametna mreža omogućava sudjelovanje klijenata u takvim primjenama kao što je odgovor na potražnju te obećava poboljšanu učinkovitost rada mreže, sposobnost samooporavljanja i otpornost protiv *cyber* napada.

Ciljevi pametne mreže uključuju [13]:

- prilagođavanje različitim vrstama proizvodnje električne energije, uključujući obnovljive izvore energije i mogućnost skladištenja,
- aktivno sudjelovanje potrošača,
- optimiziranje sredstava i operativnu učinkovitost,
- pružanje dobre kvalitete električne energije,
- pružanje mogućnosti samooporavljanja,
- jamstvo operativne otpornosti na fizičke i *cyber* napade,
- omogućavanje novih proizvoda, usluga i tržišta.

Prema Zakonu o neovisnosti i sigurnosti energije iz 2007. godine, Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (*eng. National Institute of Standards and Technology - NIST*) zadužen je za koordinaciju razvoja okvira za upravljanje informacijama kako bi se postigla interoperabilnost pametnih mrežnih uređaja. Faza 1 NIST izvještaja pruža konceptualni referentni model pametne mreže [14], a postoji i hitna potreba za uspostavljanjem protokola i standarda za pametnu mrežu.

Neki tvrde da električna mreža s modernim upravljanjem energije sustava (*eng. Energy management system - EMS*), koji se sastoji od puno udaljenih terminalnih jedinica (*eng. Remote terminal units - RTU*) koje šalju podatke u stvarnom vremenu svake 2 sekunde iz trafostanice u mrežu, pa sve do kontrolnog centra računala preko sustava nadzora i prikupljanja podataka (*eng. Supervisory control and data acquisition - SCADA*) i napredni aplikacijski softveri koji obrađuju podatke u kontrolnom centru kako bi osigurali ekonomičan i pouzdan rad, već predstavljaju pametnu mrežu [15]. Međutim, računalna i komunikacijska tehnologija koju rade

EMS i SCADA ne predstavljaju najsuvremenije ICT tehnologije. Većina elektroenergetskih sustava ne podržava kontrolu i praćenje u realnom vremenu. Osim toga, fazna mjerna jedinica (*eng. Phasor measurement unit - PMU*) [16], koja omogućuje mjerenja s vremenskim oznakama sustava globalnog pozicioniranja (*eng. Global positioning system - GPS*) u milisekundama, može se koristiti za nadogradnju EMS-a na pametniju mrežu za prijenos. S obzirom na to, moguće je imati jedinstvenu pametnu mrežu koja pokriva sve dijelove mreže, uključujući centralizirane generatore fosilnih goriva, distribuirane generatore obnovljivih izvora energije, prijenosnih i distribucijskih mreža, pametnih brojila te pametnih uređaja u prostorima potrošača [16].

Prema US Nacionalnom laboratoriju za energetska tehnologija (*eng. National Energy Technology Laboratory - NETL*), za implementaciju pametne mreže potrebne su sljedeće tehnologije [17]:

- senzori i mjerenja,
- napredne metode kontrole,
- napredne komponente,
- poboljšana sučelja i podrška odlučivanja (IIDS),
- integrirane komunikacije.

Tehnologije potrebne za implementaciju pametne mreže sažete su kao:

- Senzori i mjerenja: cilj je povećati upravljanje energijom uz česta očitavanja brojila, spriječiti krađe energije, omogućiti izbor potrošačima i reakciju na potražnju te dati podršku novim strategijama upravljanja. Biti će razmotrene dvije ključne komponente senzora, a to su PMU i pametna brojila pod naprednom mjernom infrastrukturom (AMI). PMU-i stječu vremenski sinkronizirane mjerne podatke vektora za rad elektroenergetskog sustava i dokazano je da su sposobni značajno poboljšavati performanse nadzora, zaštite i kontrole energetske sustava. Međutim, prilično su skupi, a jedan je od ključnih problema smanjivanje potrebnog broja PMU-ova, dok zadovoljavaju zahtjeve praćenja širokog područja uz punu pokrivenost. Taj optimalni problem postavljanja PMU položaja (*eng. optimal PMU placement - OPP*) privukao je mnoga istraživanja i predloženi su cjeloviti linearni programski pristupi. Međutim, zbog njihove računalne složenosti takvi pristupi ne mogu biti skalirani te su se nedavno počeli koristiti heuristički pristupi poput optimizacije kemijske reakcije [18]. Još je jedna važna infrastruktura AMI. AMI se sastoji od pametnih brojila u potrošačkim prostorijama i dvosmjernog komunikacijskog sustava koji povezuju pametna brojila s upravljačkim

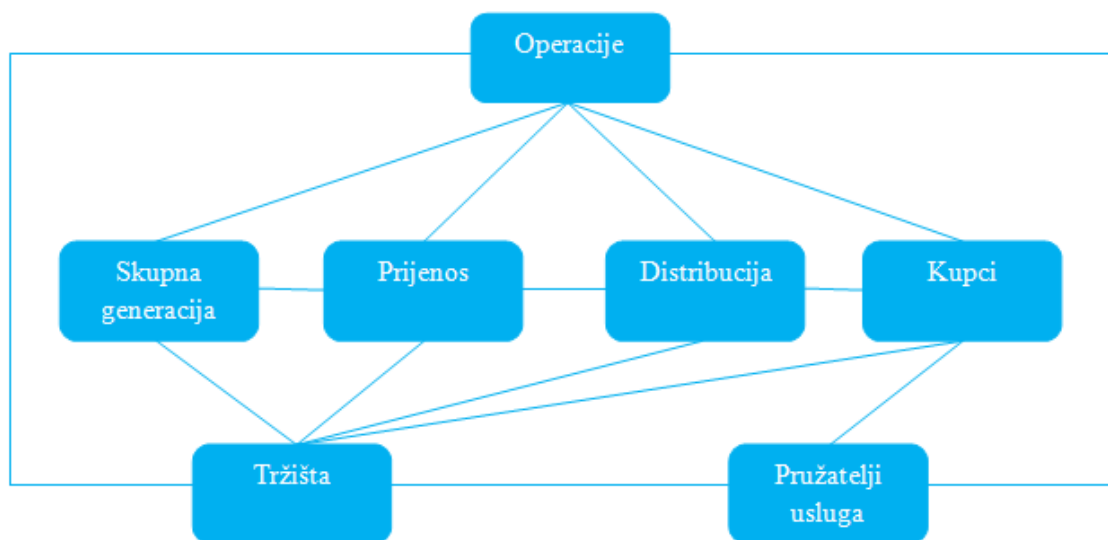
centrima pružatelja usluga. AMI omogućuje zahtjeve za cijenu i odgovor na potražnju [18].

- Napredne metode kontrole: tradicionalno slanje snage uvijek pokušava generirati dovoljno snage da zadovolji potražnju. Zbog kašnjenja u tradicionalnim elektranama, kako bi se zaštitili od nedovoljno procijenjenih zahtjeva, "pričvrzne rezerve" raspoređene su, tj. generator neprekidno radi pa se kratkoročno može staviti na mrežu, ali to ne pomaže pri smanjenju ugljičnog dioksida. S pametnom mrežom i poboljšanom procjenom stanja sustava, moguće je izbaciti rizik od ograničenja, u kojem je vjerojatnost neusklađenosti s radnim ograničenjima svedena na prihvatljivu razinu [19]. Cilj je eliminirati taj rizik korištenjem uređaja za pohranu energije i takvih tehnika kao što je odgovor na potražnju. Budući da je pohranjivanje baterija još uvijek prilično skupo, postoji mnogo istraživanja o korištenju baterija električnih vozila pričvršćenih na mrežu kako bi se osigurala pohrana. Odgovor potražnje daje komunalnom poduzeću fleksibilnost za smanjenje opterećenja odabranih korisnika u relativno kratkom roku u zamjenu za smanjenje stope električne energije [20].
- Napredne komponente: PMU je važna komponenta pametne mreže, a još jedna nedavno razvijena komponenta električna je opruga. Električni uređaj može se iskoristiti za smanjenje oscilacija u proizvodnji energije radi izvora sunčeve energije i vjetra. Oni se mogu distribuirati preko mreže kako bi stabilizirali sustav čak i kada postoje znatne proizvodnje energije iz vjetra i solarne energije [21].
- IIDS: bitne tehnologije koje se moraju provesti ako operateri i menadžeri mreže imaju alate i obuku za koju će trebati upravljati modernom mrežom. IIDS tehnologije pretvorit će kompleksne podatke o elektroenergetskom sustavu u informacije koje ljudski operateri mogu razumjeti. Animacija, virtualna stvarnost, oblikovanje boja i druge tehnike prikaza podataka spriječit će "preopterećenje podataka" i pomoći operaterima identificirati, analizirati i reagirati na probleme [17].
- Napredne komunikacije: infrastruktura za razmjenu snage i informacije u stvarnom vremenu te omogućavanje korisnicima interakciju s raznim inteligentnim elektroničkim uređajima [17]. Budući da tipična električna mreža ima postojeći komunikacijski sustav, važno je da nova komunikacijska infrastruktura bude kompatibilna s postojećim sustavom te je također važno uzeti u obzir pitanja sigurnosti i privatnosti.

Kako bi se postigla potpuna funkcionalnost tehnologije koje omogućavaju pametnu mrežu, bitnu ulogu ima komunikacijska tehnologija [17].

### 3.1. Okvir za pametnu mrežu usmjeren na komunikaciju

Da bi se bolje razumjeli komunikacijski zahtjevi pametne mreže, nužno je razviti komunikacijski okvir na kojem se mogu analizirati svi aspekti komunikacije pametne mreže. Većina postojećih radova na inteligentnim mrežnim komunikacijama bavila se komunikacijskim specifikacijama, ali su se samo usredotočili na neke specifične dijelove pametne mreže. Američki NIST predložio je okvir za pametne mreže [22].



**Slika 3.1.** NIST okvir za pametnu mrežu sa sedam domena [23]

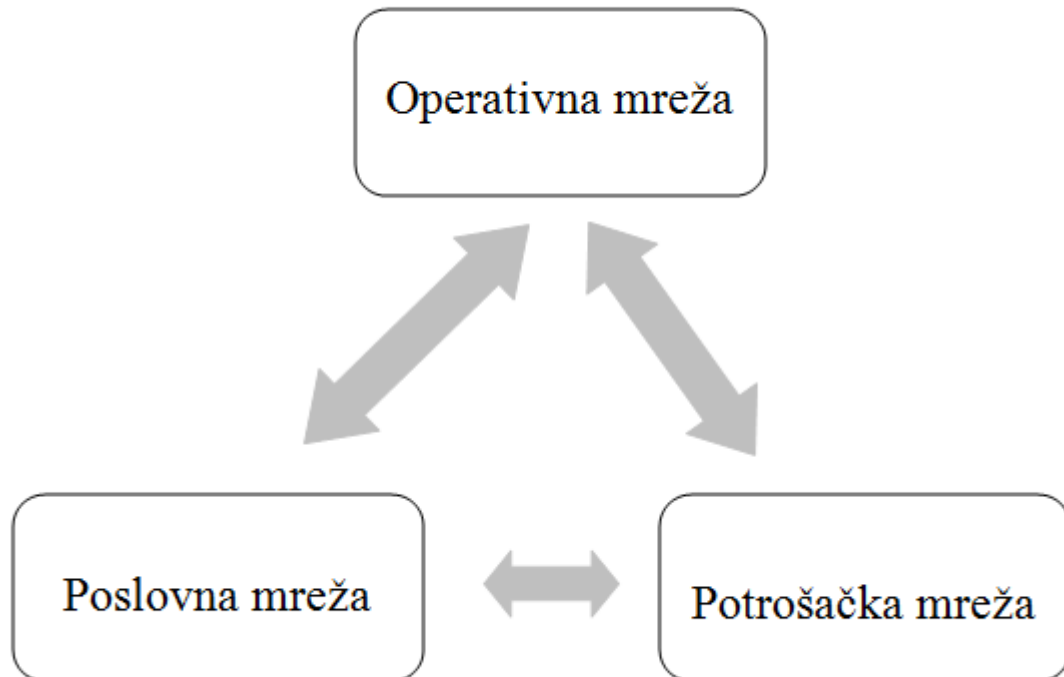
Na slici 3.1. prikazan je okvir koji se sastoji od sedam domena ili entiteta, točnije tržišta, davatelja usluga, skupne generacije, prijenosa, distribucije, operacija i kupaca. Uloga pojedine domene ukratko je prikazana na sljedeći način [23]:

- **Tržišta:** ova domena sastoji se od sudionika na tržištu električne energije i operatera. Cilj je uskladiti učinkovitu proizvodnju energije s potrošnjom te izdavanjem signalnih cijena električne energije u stvarnom vremenu. Ova domena podupire energetske nadmetanje, raspodjelu raspoloživih resursa (*eng. Distributed energy resource - DER*) i distribuciju energije. Osim toga, pomoćne operacije, kao što su regulacija frekvencije i naponska podrška, provode se na temelju informacija dobivenih iz ove domene.



- Operacije: domena se sastoji od operatera električne energije. Cilj je osigurati pouzdane i glatke operacije sustava napajanja te praćenje zahtjeva različite regulacije, kao što su SCADA i EMS. Štoviše, ovdje se mogu naći mnoge primjene za upravljanje operativnim sustavima, uključujući upravljanje pogreškama, održavanje imovine i planiranje rada.
- Pružatelji usluga: davatelj usluga pruža korisnicima električne usluge. Ova domena djeluje kao posrednik između operacija, tržišta i kupaca te pruža upravljanje korisnicima, naplatu i ostale usluge.
- Skupna generacija: ova domena sastoji se od elektrana za proizvodnju električne energije i obično je izravno povezana s tržištima te prijenosom i sučeljima s operacijama kako bi podržala kontrolu proizvodnje, mjerenje protoka energije, zaštitu i druge primjene. Jedna je od najvažnijih funkcija rasprostranjene generacije kontrola emisije stakleničkih plinova putem povećanih obnovljivih izvora energije uz primjenu naprednih uređaja za pohranu za izravnavanje neravnoteže između proizvodnje i potrošnje energije.
- Prijenos: sastoji se od prijenosnih objekata kao što su dalekovodi i transformatori te spaja proizvodnju i distribuciju. Najvažnije su funkcije održavanje stabilnosti prijenosa i smanjenje gubitaka energije, što se može postići nadzorom napona na prijenosnim stanicama. Ova domena sučelja s tržištima za nabavku pomoćnih usluga, kao što su usluge regulacije frekvencije i operacija za raspored prijenosa.
- Distribucija: domena se sastoji od distribucijskih postrojenja, uključujući distribucijske transformatore i podzemne kabele. Distribucija se povezuje s prijenosom, kupcima, tržištem i operacijama te surađuje s operacijama za upravljanjem strujama u stvarnom vremenu i tržištima za stvaranje podataka o stvarnom vremenu i potrošnji. Također, podržava praćenje i nadzor nad sredstvima i linijama te distribuiranu proizvodnju energije i dvosmjerne tokove snaga.
- Kupci: kupac je krajnji korisnik električne energije, kao što je npr. kućanstvo, komercijalno poslovanje ili industrijska tvornica. Budući da je sve češće raspodijeljena proizvodnja i skladištenje električne energije, takvi su sadržaji također uključeni. Ova je domena električki povezana distribucijom te podržava AMI koji omogućuje komunikaciju s distribucijom, operacijama, tržištima i davateljima usluga, olakšavajući tako primjene kao odgovor na potražnju, izgradnju automatizacije i mogućnost krajnjem korisniku da proda struju natrag u mrežu.

NIST okvir potpun je na visokoj razini, ali je previše složen za one koji se usredotočuju na temeljne komunikacijske mreže pa je uveden novi komunikacijsko-orientirani okvir za pametnu mrežu. Trostrani okvir, prikazan na slici 3.2., dizajniran je tako da bude fleksibilan za smještaj novih potencijalnih tehnologija pametne mreže. Sastoji se od tri subjekta, a to su operativna mreža, poslovna mreža i potrošačka mreža.



**Slika 3.2.** Trostrani okvir za komunikaciju pametne mreže [23]

Operativna mreža upravlja proizvodnjom, prijenosom i distribucijom električne energije i obično uključuje tehnologije automatizacije vezane uz naslijeđene SCADA sustave te sustave mjerenja širokog područja (*eng. Wide-area measurement systems - WAMS*) i velikih EMS sustava. Poslovnu mrežu koriste sudionici na tržištu električne energije, uključujući i pružatelje mjeračkih usluga i vladinih regulatora kako bi koordinirali tržište električne energije [23]. Potrošačka mreža upravlja komunikacijom za krajnje korisnike električne energije i uključuje mrežu domova u sklopu AMI [23].

Okvir s tri subjekta omogućuje [23]:

- jednostavnost,
- potpunost,
- kompatibilnost,
- jednostavnost implementacije,
- jednostavnost evolucije,
- jednostavnost suradnje.

Taj je okvir osmišljen samo s tri entiteta i tri vrste međuentitetske komunikacije radi lakše analize i daljnjeg razvoja. Iako je jednostavan, okvir predstavlja kompletnu sliku komunikacije pametne mreže i fleksibilan je za smještaj svih postojećih i budućih primjena pametne mreže.

Predloženi okvir kompatibilan je s NIST okvirom sa sedam domena. Operativna mreža u okviru s tri entiteta uključuje domene operacija, skupne proizvodnje, prijenosa i distribucije u NIST okviru. Poslovna mreža u okviru tri entiteta sadrži domene tržišta i pružatelja usluga u NIST okviru, dok potrošačka mreža u okviru tri entiteta odgovara domeni kupaca. Zbog te kompatibilnosti, umjesto NIST okvira sa sedam domena, može se prihvatiti jednostavan trostrani okvir za proučavanje komunikacijskih problema definiranih u NIST okviru [23].

Utvrđene su tri razine zahtjeva za komunikaciju i komponente sustava s jednakom razinom komunikacije koje su grupirane u isti entitet. Komponente u operativnoj mreži zahtijevaju najstrože zahtjeve u smislu *cyber* sigurnosti, dostupnosti podataka i kvalitete usluge (*eng. Quality of service* - QoS). Komponente u poslovnoj mreži imaju relativno manje stroge zahtjeve, dok komponente u mreži potrošača imaju najmanje stroge zahtjeve. Stoga su podijeljeni u tri entiteta radi olakšavanja implementacije mreže i kontrole komunikacijskih entiteta [23].

Operativna mreža već desetljećima postoji kao jezgra automatizacije elektroenergetskog sustava, a velike tvrtke ulažu velike investicije. Zbog takvih ulaganja, budući napori za istraživanja i razvoj na ovom području vjerojatno će se usredotočiti na razvoj postojeće mreže, za razliku od temeljne promjene, kako bi se ispunili zahtjevi za pametnu mrežu. Predložene su internetske tehnologije za podršku poslovnoj mreži [24]. Napori za razvoj i istraživanje vjerojatno će se usredotočiti na dizajn novih aplikacija i na sheme regulacije tržišta električne energije. Potrošačka mreža relativno je nova, a razvoj i istraživanje na pametnom mjerenju te

odgovor na potražnju i upravljanje DER-om pokazat će se unosnim. Budući elektroenergetski sustav zahtijeva stručnost ICT stručnjaka, elektrotehničara, poslovnih stručnjaka i vladinih dužnosnika, a njihovu suradnju mora olakšati komunikacijsko-orijentirani okvir.

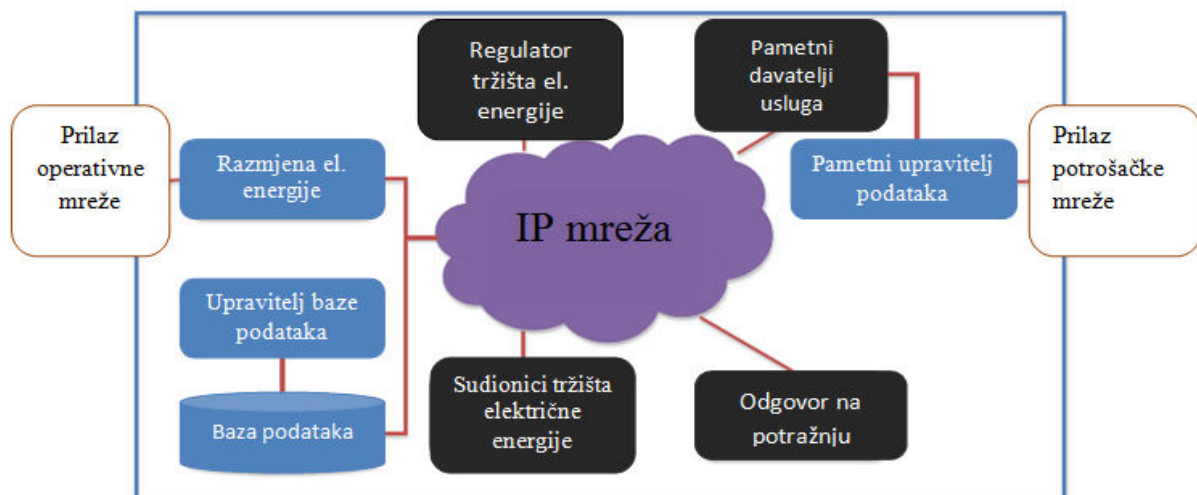
### 3.1.1. Operativna mreža

Operativna mreža odgovorna je za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije te za održavanje stabilnosti i učinkovitosti cijelog elektroenergetskog sustava. Operativna mreža sastoji se od osam glavnih komponenta koje su opisane u nastavku.

- Prolaz poslovnih mreža i mreža pristupnika za potrošače povezuju mrežu operacija i poslovnu mrežu, odnosno mrežu operacijskih i potrošačkih mreža,
- Kontrolni centri prikupljaju i obrađuju podatke o mrežnim operacijama. Različiti kontrolni centri međusobno komuniciraju kako bi kontrolirali cijelo područje operacije putem namjenske, sigurne brzine mreže, upravljajući različitim objektima u pametnoj mreži,
- Baza podataka za praćenje i kontrolu koristi se za pohranjivanje povijesnih podataka sustava, uključujući parametre stanja mreže tijekom rada i zapisnike događaja za operatore,
- Mreža za praćenje i kontrolu širokog područja (*eng. Wide-area monitoring and control network - WAMCN*) stječe podatke s udaljenih postaja ili trafostanica i izdaje kontrolne naredbe. Ove daljinske postaje mogu međusobno komunicirati kako bi dobili bolju sliku stanja sustava,
- Proizvodna postaja postrojenje je koje generira električnu energiju. Svaka proizvodna stanica koristi pristupnik s ugrađenim prevoditeljem protokola za spajanje mrežne stanice WAMCN,
- Uređaji za prijenos obuhvaćaju sve terenske uređaje koji se nalaze na udaljenosti od elektrane i trafostanice. Većina su tih uređaja uređaji za praćenje i upravljački uređaji koji komuniciraju s upravljačkim centrima ili obližnjim stanicama kako bi pružili izvješće o statusu nadziranih objekata,
- Trafostanica distribuira električnu energiju potrošačima. Pristupnik je instaliran za trafostanicu za pristup WAMCN-u.

### 3.1.2. Poslovna mreža

Poslovna mreža sastoji se od komponenti regulatora tržišta električne energije, davatelja pametnih usluga brojila, respondera i sudionika tržišta električne energije. Kao što je prikazano na slici 3.3., povezani su putem virtualne privatne mreže (eng. *Virtual private network -VPN*) na temelju IP-a i podržani od strane upravitelja baze podataka koji upravlja informacijama o tržištu električne energije. Opisani su na sljedeći način [23]:

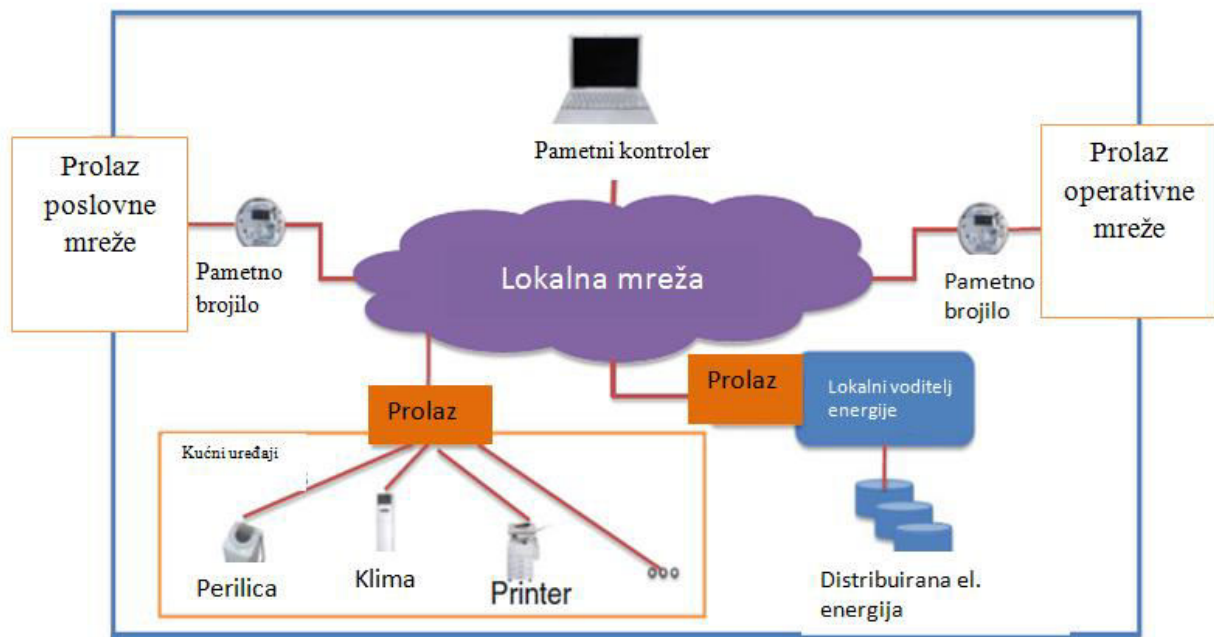


Slika 3.3. Poslovna mreža [23]

- regulator tržišta električne energije odnosi se na vladu ili kvazivnu upravnu organizaciju koja regulira tržištem,
- pametni su davatelji usluga komunalije koje pružaju pametne mjerne usluge krajnjim korisnicima,
- odgovor na potražnju odnosi se na strujni sustav koji pokušava mijenjati potrošnju agregatne električne energije od strane kupaca kako bi se podudarala ukupna potrošnja s ukupnom proizvodnjom električne energije. Da bi se to postiglo, korisni programi mogu pružiti poticaje krajnjim korisnicima kako bi smanjili potrošnju kada je ukupna potražnja visoka ili da se dogovore isključiti neke uređaje na zahtjev, putem smanjenih komunalnih naknada,
- sudionici na tržištu električne energije oni su koji trguju električnom energijom.

### 3.1.3. Potrošačka mreža

Slika 3.4. prikazuje potrošačku mrežu koja je lokalna mreža u prostoru potrošača. Može se nalaziti u jednoj stambenoj jedinici ili može povezati više jedinica. Glavne komponente potrošačke mreže prikazane na slici 3.4. opisane su u nastavku:



**Slika 3.4.** Potrošačka mreža [23]

- pametni kontroler koordinira cijelu mrežu potrošača – odgovoran je za automatsko uključivanje ili isključivanje opterećenja prema trenutnom statusu mreže temeljem dogovorenih ugovora, analizom pametnih mjernih podataka i upravljanjem lokalnom pohranom podataka,
- pametno brojilo koje se povezuje s operativnom i poslovnom mrežom procjenjuje raspored korištenja električne energije i šalje ga na operativnu mrežu. Također dobiva stope električne energije u stvarnom vremenu iz poslovne mreže,
- kućna elektronika ili uređaji,
- lokalni voditelj energije obrađuje proizvodnju i skladištenje energije u prostorima potrošača.

Komunikacije među trima entitetima potrebne su za učinkovitu pametnu mrežu. Komunikacija između operativne i poslovne mreže zahtijeva najvišu razinu pouzdanosti i sigurnosti jer čini okosnicu cijele pametne mreže. Komunikacija između operativne i potrošačke mreže također zahtijeva visoku sigurnost, a raspored upotrebe kupaca bit će prenesen na radnu mrežu te se mora osigurati privatnost klijenata. S druge strane, komunikacija između poslovne i potrošačke mreže zahtijeva visoku dostupnost podataka i visoku pouzdanost, ali relativno manje strožu sigurnost [23].

### 3.2. Uvjeti komunikacije

Dogovoreno je da je potrebna velika putanja električne energije za podršku proizvodnim, prijenosnim trafostanicama, potrošačima i upraviteljima distribucije i isporuke [25]. Jedan od glavnih izazova razvoj je komunikacijske infrastrukture koja podržava univerzalnu povezanost i praćenje u stvarnom vremenu na razini sustava. Višestruki primatelji moraju moći primiti ažurirane informacije o statusu sustava, s različitim zahtjevima za latenciju i brzinu. Konkretno, identificirani su sljedeći komunikacijski zahtjevi [23]:

- mogućnost obrade velikog volumena podataka,
- opsežna pokrivenost: mreža mora pokriti cijeli elektroenergetski sustav, uključujući proizvodnju, distribuciju i potrošnju energije,
- QoS podrška: sustav mora biti fleksibilan za prilagodbu različitih pouzdanosti, kašnjenja i ograničenja propusnosti. Kao što je ranije spomenuto, može postojati razmjena između QoS i sigurnosnih zahtjeva,
- *cyber* sigurnost: sustav mora biti siguran od *cyber* napada, što predstavlja iznimno važan uvjet.

### 3.3. Zahtjevi za sigurnost i privatnost

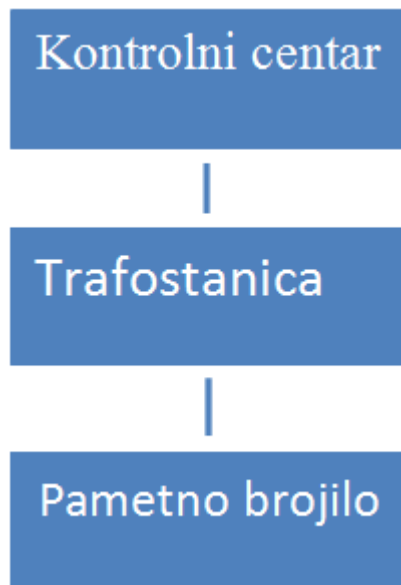
Energetska je mreža možda najvažnija nacionalna infrastruktura u mnogim zemljama, a komunikacije za sigurno očuvanje privatnosti presudne su za operacije pametne mreže. Stručnjaci sigurnosti opazili su da se neke vrste senzora pametne mreže mogu lako hakirati [26].

Osim toga, crvi se lako mogu širiti među sensorima pametne mreže [27]. Identificirano je nekoliko potencijalnih napada na pametnu mrežu [28] koji će biti opisani u nastavku.

- Dos (eng. *Distributed denial-of-service* - DDoS) napad: u DDoS napadu, hakirane senzore, koji mogu biti zemljopisno distribuirani, upućuje haker kako bi istodobno poslali veliku količinu prometa žrtvi ili kontrolnom centru. Senzor žrtve ili upravljački centar bit će preplavljen golemim prometom, a normalni podaci ne mogu se ispravno obrađivati. Stoga je neophodno razviti metodologije za omogućavanje senzora ili centra za kontrolu razlikovanja autentičnog i lažnog prometa te prepoznavanje neispravne opreme
- Istovremeni napad isključivanja: napadač se može pretvarati da je upravljački centar i poslati lažne poruke zapovjednim sensorima i drugim uređajima sustava kako bi se isključio te bi pametna mreža bila neučinkovita. Upravo zbog toga mora se osigurati povjerljivost integriteta i vjerodostojnost kontrolnih poruka.
- Lažna potražnja za snagom: napadač može presresti i mijenjati procijenjene rasporede korištenja pametnih brojila do operativne mreže kako bi se dramatično povećala ili smanjila potražnja energije. To može dovesti do neravnoteže snage u sustavu i uzrokovati kvarove napajanja, zbog čega je važno osigurati povjerljivost, integritet i vjerodostojnost poslanih podataka.

Drugi glavni problemi sigurnosti i privatnosti također su identificirani i proučeni [29]. Za komunikaciju između kontrolnog centra i pametnog mjerača može se dokazati da pristup statističke analize ne može zaštititi sustav od napada lažnih podataka [30]. Pristup statističke analize ionako neće funkcionirati jer zahtijeva da sustav obrađuje veliki volumen podataka u stvarnom vremenu, a upravljački centar pametne mreže neće moći pravodobno odgovoriti. Osim toga, pametno brojilo identificirano je kao slaba točka AMI-a i pametnog mrežnog komunikacijskog sustava [31]. Budući da se pametno brojilo nalazi u prostorijama kupaca, upravljački centar teško ga može zaštititi od potencijalnih napadača. Štoviše, pametno brojilo jeftin je uređaj i njegova memorija i procesorska snaga previše su ograničeni da bi upravljao složenim zaštitnim mjerama. Moguće je da napadači hakiraju svoje pohranjene podatke ili da čak obrate inženjering i modificiraju svoju logiku. Stoga se pametna brojila mogu smatrati najranjivijim komponentama pametne mreže [32]. Troslojna arhitektura prikazana na slici 3.5. predlaže se za proučavanje sigurnosnih i privatnih problema komunikacije između pametnog brojila i upravljačkog centra pametne mreže.





**Slika 3.5.** Troslojna arhitektura za komunikaciju pametnog brojila [32]

Na gornjem sloju nalazi se kontrolni centar elektroprivrede. Na srednjem sloju nalaze se trafostanice u distribucijskoj mreži, a svaka trafostanica odgovorna je za napajanje servisnog područja. Pametna brojila koja su postavljena u prostorijama kupca smještena su na najnižem sloju i komuniciraju s kontrolnim centrom preko trafostanice u svom području. Kontrolni centar može biti jedan poslužitelj smješten unutar elektrane ili se može geografski distribuirati.

U prikazanom troslojnom modelu identificirani su sljedeći sigurnosni zahtjevi [32]:

- provjera autentičnosti poruka: svaku poruku koju je poslalo neko pametno brojilo trebalo bi provjeriti radi potvrde valjanosti,
- očuvanje privatnosti identiteta: radi zaštite privatnosti korisnika, pravi identitet klijenta treba biti povjerljiv svima, uključujući operatera električne energije,
- povjerljivost poruke: sadržaj poruke koju pametno brojilo šalje u kontrolni centar mora bit nepoznato od treće strane,
- sljedivost: operator energije treba znati ukupnu količinu energije koju svaki klijent koristi u određenom razdoblju servisa tako da se može pripremiti odgovarajući račun za električnu energiju.

Trenutno nema potrebe da kupac obavijesti energetska službu koliko će električne energije zahtijevati. Energetska tvrtka procjenjuje potrošnju električne energije na temelju povijesnih i drugih čimbenika i stvara dovoljno električne energije kako bi zadovoljila opterećenje. Prema predloženoj paradigmi zahtjeva za unaprijeđenje energije, moć se generira na temelju eksplicitnih zahtjeva kupaca. Kupac je dužan dostaviti dnevne planove potrošnje energije, tj. potrebnu električnu energiju potrebnu u satnim intervalima tijekom dana. Ti se zahtjevi mogu poslati različitim prethodnim obavijestima, primjerice jedan dan ili tjedan unaprijed, ali ne u stvarnom vremenu. Taj proces može biti automatiziran pomoću pametnog brojlara koji komunicira sa svim kućanskim aparatima i pohranjuje profil korištenja kupca te predviđa korištenje energije za taj dan na temelju umjetne inteligencije ili drugih tehnika [32].

Prateći troslojni model, kao što je prikazano na slici 3.5., i usmjerujući ga na četiri navedena sigurnosna i privatna zahtjeva, predložena je shema za unaprijed zadani zahtjev za očuvanje privatnosti (*eng. Privacy preserving advance power request - PPAPR*) [33], koji se sastoji od četiri modula:

- pokretanje sustava,
- zahtjev za vjerodostojnost,
- podnošenje plana korištenja,
- usklađivanje.

## 4. KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI

Razmjena podataka potrebnih za pravilno pokretanje pametne mreže mora obuhvatiti sve razine elektroenergetskog sustava i preuzeti novu kvalitetu u odnosu na tradicionalne komunikacijske metode. Neizmerno povećanje volumena podataka koji se prenose zahtijeva primjenu naprednih informacijskih i komunikacijskih tehnologija (*eng. Information and communication technologies - ICT*) kako bi se izbjeglo iznimno povećanje inženjerskih napora i kako bi se osigurale dosljednost i sigurnost prijenosa podataka s razine na razinu [34].

Učinkovitost arhitekture ICT sustava zahtijeva da svi moduli budu oblikovani u skladu s jedinstvenim, otvorenim i globalno prihvaćenim standardima. Slika 4.1. prikazuje koje glavne funkcije moraju obuhvatiti novi standardi [34]:

- *online* prijenos podataka putem komunikacijskih mreža,
- dosljedno upravljanje informacija i razmjena podataka između baza podataka različitih sustava,
- zaštitu od manipuliranja podacima i osiguranje informacijske sigurnosti.



**Slika 4.1.** Glavni aspekti standardizacije ICT za pametne mreže [34]

Općenito, komunikacijski standardi slijede referentni model sedam slojeva ISO/OSI (*eng. International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection - ISO/OSI*) prema slici 4.2.



**Slika 4.2.** ISO / OSI komunikacijski referentni model [34]

Svi slojevi međusobno su neovisni, što omogućuje različite kombinacije slojeva, kao što je npr. primjena slojeva s dugoročnom stabilnošću (npr. aplikacijski sloj koji pokriva podatkovne modele i komunikacijske usluge) sa slojevima koji se mijenjaju u skladu s napredovanjem tehnologije (npr. sloj veze ili fizički sloj) [34]. Funkcije slojeva opisane su analogijom "pismo", a samo pismo izražava misli i potrebne informacije za prijemnik u rečenicama s definiranom sintaksom i semantičkim odabirom jezika unutar aplikacijskog sloja. Informacije moraju biti predstavljene u pisanom obliku, a način prijenosa mora se definirati u sloju sesije. Transportni sloj zahtijeva adresu primatelja, dok mrežni slojevi definiraju koji se davatelj usluga koristi za prijenos i uglavnom su odgovorni za siguran prijenos informacija. U slučaju objavljenog pisma, to se može obaviti provjerom statusa prijenosa na mreži i obaveznom potvrdom po dolasku na primatelja [34].

Točna definicija svih slojeva gradi komunikacijski protokol. Jednostavni komunikacijski protokoli mogu koristiti samo slojeve 1, 2 i 7. Međutim, ograničeni su za određene točka-točka veze. Komunikacijske mreže širokog područja (*eng. Wide area communications networks - WAN*) koriste shemu adresiranja telekomunikacijskog protokola/internet protokola (*eng. Telecommunication Protocol/Internet Protocol - TCP/IP*) na transportnim i mrežnim slojevima [34].

Veza ili fizički slojevi mogu se mijenjati na putu kroz komunikacijsku mrežu, ali se za promjenu traži pretvorba u novi protokol. Shema adresiranja prethodnih slojeva mora biti stabilna kako bi se osiguralo da poruka stigne do pravog prijatelja. Aplikacijski spoj vrlo je važan za dosljedan, vjerodostojan i jasan izraz informacija. Standard mora definirati sintaksu i semantiku modela podataka jer računalna inteligencija nije sposobna poput ljudske inteligencije. Ako kontrolni centar komunicira s partnerima koji predstavljaju komponente slojeva, svi se ti slojevi aplikacije moraju ugraditi u računalni centar za nadzor. Definicija jedinstvenih modela podataka aplikacijskog sloja obavezan je preduvjet učinkovitog komunikacijskog sustava pametne mreže [34].

Za komunikaciju s električnom mrežom, zbog povijesnih razloga, trenutno se koriste razni komunikacijski standardi, npr. unutar trafostanica za različite vrste sredstava (zaštita, sklopna postrojenja ili mjerila) i između trafostanica i upravljačkih centara. Ova praksa zahtijeva pretvorbu formata podataka između različitih razina sustava, što zauzvrat zahtijeva visoke inženjerske napore i izvor nedosljednosti. Nadalje, otkrivanje nedosljednosti u razmjeni informacija uzrokuje veće napore testova za puštanje u rad [34].

Tradicionalni daljinski upravljač elektroenergetskog sustava strukturiran je u skladu s važnosti komponenti sustava za pouzdanost opskrbe. Funkcija daljinskog upravljanja i nadzora koja se temelji na komunikacijskim postrojenjima pokriva prijenosnu mrežu, mrežu regionalne distribucije i srednje-naponske (*eng. Medium-Voltage - MV*) sabirnice u visoko-naponskim (*eng. High-Voltage - HV*) i srednje-naponskim (*eng. Medium-Voltage - MV*) postrojenjima [34].

Iz ekonomskih razloga, srednje-naponske i nisko-naponske mreže nisu opremljene funkcijom daljinskog upravljanja i povezanim komunikacijskim uređajima. Sve operacije na toj mrežnoj razini zahtijevaju lokalnu prisutnost operatora. Međutim, u neplaniranim situacijama kao što su poremećaji osoblja može doći samo do pogođenog dijela mreže nakon odgode [34].

Izazovi pametne mreže zahtijevaju duboku promjenu paradigme u području nadziranja kontrole i prikupljanja podataka za električne mreže. Prije svega, komunikacija mora prodirjeti

razinu distribucije do korisnika nisko-naponske mreže kako bi obavili tri stupa pametne distribucije. Komunikacija se spušta prema nisko-naponskim mrežama radi [34]:

- automatizacije distribucije,
- upravljanja energijom,
- pametnog mjerenja.

Drugo, moraju se primjenjivati globalni standardi protokola koji koriste jedinstvene modele podataka i usluge kako bi se osigurala inovativna učinkovitost, interoperabilnost i sposobnost inteligentnih elektroničkih uređaja (*eng. Intelligent electronic devices-IEDs*) različitih dobavljača, dosljednost podataka i sigurnost informacija na svim razinama elektroenergetskog sustava. Jedinstveni standardi na svim razinama jesu [34]:

- učinkovito inženjerstvo,
- interoperabilnost,
- dosljednost podataka,
- sigurnost.

Operatori prijenosnog sustava često koriste internu komunikacijsku mrežu za svoje SCADA sustave. Međutim, poboljšanje operacije distribucijske mreže može koristiti postojeće infrastrukture za komunikaciju.

Operator distribucijske mreže (*eng. The distribution network operator - DNO*) može uspostaviti vlastite komunikacijske kanale koristeći PLC tehnologije (*eng. Power Line Carrier - PLC*) ili ugovoriti pružatelja komunikacijskih usluga koji može osigurati ponudu posebne komunikacijske domene s visokom sigurnošću informacija i performansama mreže povezane SCADA funkcijama [34].

Najučinkovitije komunikacijske tehnologije koje se mogu primijeniti ovise o lokalnim uvjetima i mogu biti u različitim fizičkim oblicima: bakreni kabeli, svjetlovodni kabeli i radio. Potencijalni standardni komunikacijski standard trebao bi ponuditi sljedeće aspekte [34]:

- globalno prihvaćanje,
- manje inženjerstva pomoću instrumenata i modela orijentiranih na objekt,

- usluge koje osiguravaju kvalitetu, učinkovitost, točnost i sigurnost razmjene informacija,
- visoke performanse proširenja koja se odnose na buduće aplikacije,
- fleksibilnost pri primjeni potencijalne inovativne komunikacije na fizičkim i veznim slojevima,
- primjenu budućih tehnologija u modelu sa sedam slojeva,
- sučelja s drugim standardima i kontinuitetom u novim standardnim proširenjima.

Razvoj odgovarajućih komunikacijskih standarda započeo je 1980. godine i još uvijek je u tijeku. Razvoj standardnih komunikacijskih protokola imao je dubok utjecaj na arhitekturu i performanse SCADA sustava. I SCADA tehnologija i komunikacijski standardi razvijeni su u međusobnom kontekstu. Međutim, povijest razvoja uzrokovala je uvođenje brojnih vlasničkih, regionalnih i međunarodnih standardnih serija koje se još uvijek primjenjuju u praksi kontrole elektroenergetskog sustava [34].

#### **4.1. Standardi za upravljanje podacima**

Sustavi upravljanja procesima poduzeća (*eng. Enterprise process management - EPM*) danas se široko koriste za upravljanje svim procesima poduzeća na temelju digitalnih baza podataka na učinkovit način [34]. Poduzeća koriste široku paletu EPS-a za različite procese, a takve EPM sustavi razvijaju i isporučuju različiti dobavljači. Slijedom toga, formati podataka koji se koriste u komercijalnim bazama podataka specifični su za dobavljače. Ukupno upravljanje poduzećem sastoji se od mnogih komponenata koje međusobno djeluju, a ti će sustavi u budućnosti biti složeniji [34]. U praksi su isti podaci često važni za nekoliko EPM sustava. Primjerice, parametri transformatora koriste se u bazama podataka sljedećih EPM sustava za upravljanje mrežom [34]:

- SCADA,
- sustavi upravljanja energijom (*eng. Energy management systems - EMS*) ili sustavi upravljanja distribucijom (*eng. Distribution management systems - DMS*),
- zemljopisni informacijski sustav (*eng. Geographical information system - GIS*),
- planiranje mreže,

- upravljanje imovinom,
- upravljanje održavanjem,
- upravljanje prekidima.

Mjerene vrijednosti mogu biti potrebne u različitim vrstama EPM sustava [34]:

- upravljanje proizvodnjom - za raspoređivanje,
- upravljanje mrežom - za SCADA,
- DMS,
- servis i briga o kupcima - za naplatu, informacije zakupce, upravljanje energijom, upravljanje podacima o mjernim uređajima,
- prodaja i trgovanje - za trgovanje energijom, predviđanje prodaje.

Zbog višestruke upotrebe podataka, širok raspon formata podataka koji se koriste u bazama različitih dobavljača stvara sljedeće probleme [34]:

- Razmjena podataka između baza podataka složena je zbog različitih formata podataka. Svaka procedura razmjene podataka zahtijeva konverziju iz jednog u drugi format.
- Promjene podataka moraju se provoditi u svim bazama podataka u kojima se podaci koriste, inače će dosljednost EPM sustava biti izgubljena
- Održavanje baze podataka dodjeljuje se različitim entitetima unutar poduzeća ili općenito različitim poduzećima. Teško je izvršiti simultanu prilagodbu podataka

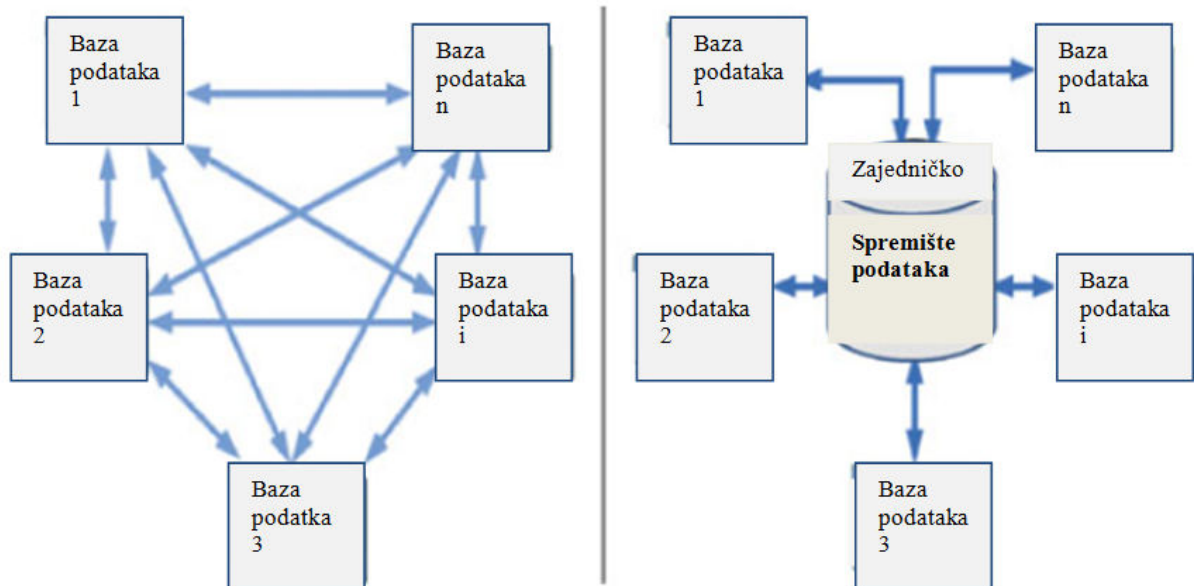
Automatska raspodjela podataka bila bi rješenje za održavanje dosljednosti podataka u svim bazama podataka koji se koriste za procese opskrbe električnom energijom. Međutim, to bi zahtijevalo pretvarače formata podataka između svih uključenih baza podataka i to u svim smjerovima kao npr. iz baze podataka 1 s modelom podataka A do baze podataka 2 s modelom podataka B, kao i iz baze podataka 2 s modelom podataka B do podataka baze 1 s modelom podataka A [34].

Dolazi do potrebe za zajedničkim skladištem podataka koji se mogu koristiti za održavanje svih baza podataka korištenjem zajedničkog informacijskog modela te se broj adaptera između komponenti povećava ako se koriste vlasnički oblici podataka. Prilikom



primjene zajedničkog informacijskog modela, postoji samo potreba za jednom prilagodbom između relevantnih baza podataka i zajedničkog spremišta podataka [34].

Slika 4.3 prikazuje taj odnos kod kojeg svaka strelica predstavlja dvosmjerni pretvarač formata podataka.



**Slika 4.3.** Količina pretvarača podataka pri korištenju različitih vlasničkih formata podataka i zajedničkog oblika podataka [34]

Najjednostavniji način razmjene podataka između entiteta ili poduzeća i održavanje svih baza podataka primjena je zajedničkog informacijskog modela u svim bazama podataka [34]. Operatori prijenosnog sustava u Europi i Sjevernoj Americi počeli su slijediti ovu metodu i prenositi svoje baze podataka na zajednički informacijski model (*eng. Common information model - CIM*) prema IEC 61970 [34].

#### 4.1.1. Sigurnost informacija

Elektroenergetske mreže pripadaju kritičnim infrastrukturnim sustavima. Daljinsko upravljanje i nadzor električnih mreža ranjivi su na nekoliko sigurnosnih prijetnji [34]:

- interni napadi,

- prirodne katastrofe,
- kvarovi opreme,
- bezobzirnost,
- upravljanje podacima,
- gubitak podataka.

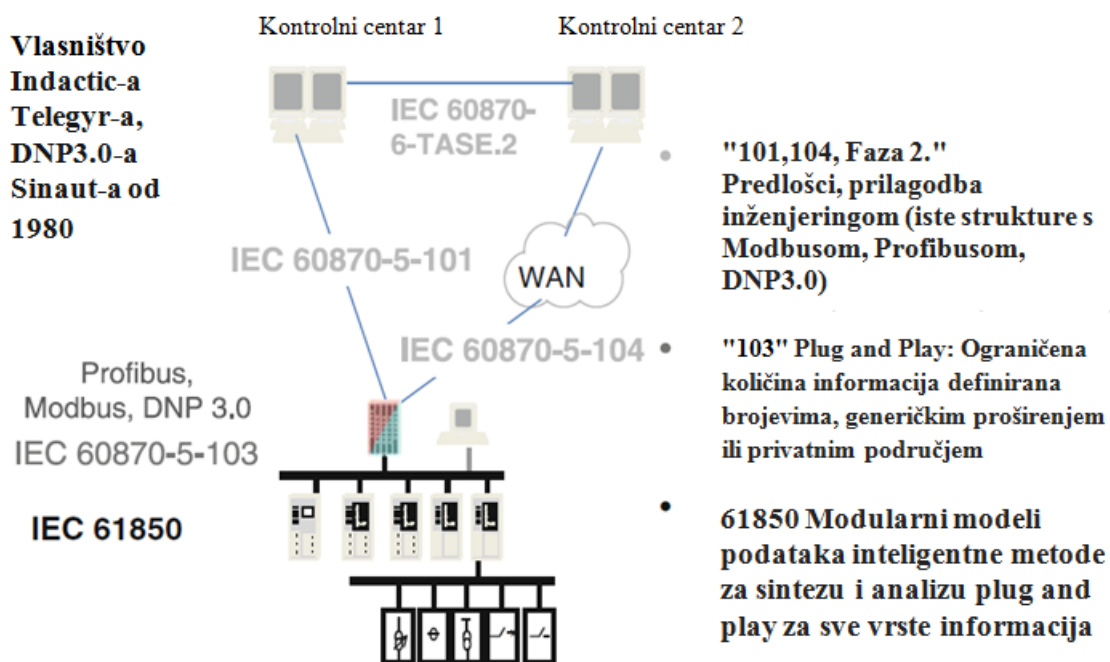
Reakcije na prijetnje mogu fizički oštetiti imovinu mreže i imaju ogromne pravne, društvene i financijske posljedice. Da bi se mogli zadovoljiti zahtjevi u smislu povjerljivosti, dostupnosti, integriteta i standarda neodbijanja za informacijsku sigurnost, moraju se primjenjivati napredni postupci. Moraju se primijeniti napredni načini šifriranja i ciljevi standarda IEC 62351 kako bi se osigurala sigurnost upravljanja elektroenergetskim sustavom putem komunikacijskih mreža [34]. Slika 4.4 prikazuje moguće prijetnje informacijskoj sigurnosti.



**Slika 4.4.** Moguće prijetnje informacijske sigurnosti [34]

## 4.2. Digitalni komunikacijski protokoli

Razvoj SCADA tehnologije bio je praćen i potaknut razvojem odgovarajućih serijskih komunikacijskih protokola. Krajem sedamdesetih godina, vodeći proizvođači SCADA sustava uveli su svoje specifične vlasničke protokole kao što su Sinaut, Telegyr, Indactic i DNP za komunikaciju između trafostanica i kontrolnih centara. Kontrolni centri morali su razumjeti sve protokole implementirane u tehnologijama daljinskog upravljanja različitih dobavljača instaliranih u trafostanici. Hitna potreba za standardima u ovom području bila je očigledna. Nakon standardizacije procesa koji je trajao nekoliko godina, stvoreni su različiti regionalni i međunarodni protokoli, kao što je prikazano na slici 4.5. [35].



**Slika 4.5.** Standardi za komunikaciju u elektroenergetskim sustavima [35]

Sredinom osamdesetih godina počela se razvijati telekomunikacijska standardna serija IEC 60870. Za primjenu u kontroli elektroenergetskog sustava, protokol "101" bio je prilagođen

seriji IEC 60870-5. Međutim, prvo izdanje kao službeni standard IEC 60870-5-101 objavljen je tek 10 godina kasnije, u studenom 1995. godine [35].

Prva objavljena međunarodna norma IEC 60870-5-101 standard je nadzor za elektroenergetski sustav, kontrolu i povezane telekomunikacije elektroenergetskih sustava. To je popratni standard koji se temelji i potpuno je kompatibilan sa standardima IEC 60870-5-1 prema IEC 60870-5-5 koji definiraju osnovna pravila komunikacijskih postupaka. Također, koristi standardno asinkrono serijsko sučelje s brzinom komunikacije od 19,2 kBd. Standard se temelji na načelu anketiranja i podržava neuravnotežen i uravnotežen način prijenosa podataka [35].

Standard definira oblike okvira razmjene podataka. Početni okvir sadrži početni znak, duljinu okvira, kontrolno polje za označavanje smjera poruka i adresu veze. Identifikacijsko polje ovog okvira sadrži identifikator tipa i identifikator strukture varijable. Obje definiraju strukturu i duljinu jedinice za aplikacijske usluge (*eng. Application Service Data Unit - ASDU*) [35]. Tip identifikatora opisuje vrstu i attribute informacijskog objekta. Svakom tipu identifikatora dodjeljuju se broježani kodovi. Odabir tipova sa ili bez vremenske oznake pripada prošlosti. Danas se ASDU-ima dodjeljuju vremenske oznake s rezolucijom od 1 ms.

Identifikacija varijable strukture definira broj naknadnih informacijskih objekata unutar ASDU. Razlozi prijenosa mogu biti u smjeru nadzora [35]:

- spontani,
- ciklički,
- na zahtjev,
- opće ispitivanje,
- potvrda naredbe.

U smjeru upravljanja primjenjuju se opća naredba, parametar sklopa općih postavki i dr., a uzroci prijenosa kodirani su određenim brojevima. ASDU adresa predviđena je za klasifikaciju krajnje stanice primatelja i njenih različitih segmenata. Prema tome, kada je polje identifikacije završeno, struktura je ASDU okvira fiksna [35].

Informacijski objekt ima specifičan broj adresa koji se mora dodjeljivati inženjeringom. Ta adresa npr. definira da tip "izmjerena vrijednost" izražava struju u fazi A od 110 kV transformatorskog ulagača 101 ili da tip "pokazivanje dvostrukom točkom" izražava položaj

prekidača transformatora 110 kV ulagača 102. Taj adresni broj mora bit konstruiran jednako u kontrolnom centru i na trafostanici. Skup elemenata podataka sadrži vrijednost poruke ili naredbe - izmjerenu vrijednost plutajuće točke, broj mjesta položaja transformatora ili položaj prekidača u skladu s tipom identifikatora [35].

IEC 60870-5-101 proširen je na standardni IEC 60870-5-104 koji koristi *Ethernet* i shemu TCP/IP adresiranja na slojevima 2-4. Stoga se ovaj komunikacijski standard može primijeniti u širokopojsnim komunikacijskim mrežama. Nadalje, razvijen je i objavljen standardni IEC 60870-6-TASE.2 za potrebe komunikacije između kontrolnih centara [35].

Standardi IEC 60870-5-101 i IEC 60870-5-104 trenutno se primjenjuju u svijetu u većini SCADA sustava za kontrolu električne mreže. Glavni je nedostatak tih standarda potreba za inženjeringom adresa informacijskih objekata. Ova metoda sprječava "*plug and play*" značajku [35].

Inženjerstvo informacije o adresi zahtijeva veliku količinu ljudskog napora. Inženjerstvo mora biti izvedeno korištenjem različitih inženjerskih alata i obično ih izvode različiti stručnjaci s obje strane komunikacije. Visok rizik od nedosljednih skupova podataka prati ovaj pristup [35].

Ostali protokoli, osim standarda IEC protokola, stekli su važnost za standarde u posebnim regijama ili područjima primjene. Protokoli *Modbus* i *DNP3.0* dobro su raspoređeni u Sjevernoj Americi. *Profibus* se često primjenjuje u industrijskim mrežama kako bi se osigurala kompatibilnost s komunikacijom koja se koristi za proizvodne procese. Sva tri protokola temelje se na sličnoj strukturi IEC 60870-5 protokola i ne dopuštaju "*plug and play*" bez opsežnog inženjerstva [35].

Protokoli koji su se koristili za zaštitu podatkovnih komunikacija bili su ponovno specifični za dobavljače. Uobičajena je praksa operatora prijenosnog sustava da instaliraju zaštitne releje različitih dobavljača za glavnu i rezervnu zaštitu [35].

Vlasnički protokoli i zahtjev za intenzivnim inženjerstvom s prethodno opisanim komunikacijskim standardima ne mogu se prihvatiti u skladu s filozofijom zaštite. Interoperabilnost uređaja različitih proizvođača i "*plug and play*" značajke su postale prioritetni zahtjev [35].

U okviru kratkoročnog pristupa, preporuke VDEW (njemačko društvo mrežnih operatora) proširene su prilikom općih proširenja. Odgovarajući standard IEC 60870-5-103

objavljen je kao nacrt odbora za glasovanje (*eng. Committee draft for voting - CDV*) 1995. godine i vrijedi od 1997. godine [36].

Standardni IEC 60870-5-103 omogućuje interoperabilnost između zaštitne opreme i uređaja kontrolnog sustava u trafostanici. Standard IEC 60870-5-103 temelji se na okviru sličnom kao kod IEC 60870-5-101. Glavni razlog ponašanja utikača i reprodukcije sastoji se u fiksnoj definiciji adrese informacijskog objekta [36].

Adresa informacijskog objekta zamijenjena je s dva određena identifikatora:

- vrsta funkcije zaštitnog uređaja,
- informacijski broj.

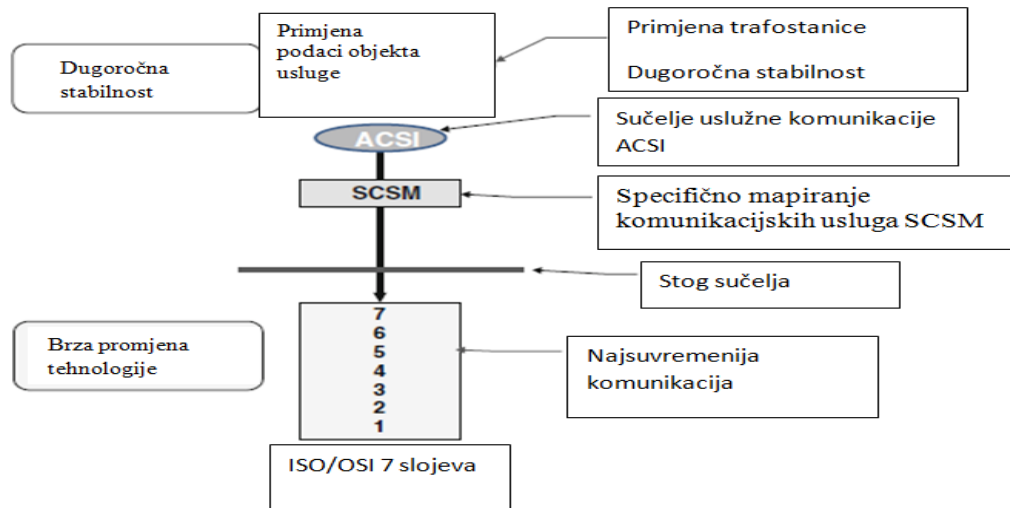
Informacije o funkcijama zaštite, kao što su automatsko zatvaranje, provjera sinkronizacije, lociranje kvara ili zabilježeni poremećaji, dodjeljuju se funkcionalnoj vrsti glavnog načela zaštite. IEC 60870-5-103 standard nudi 83 kompatibilnih i 17 generičkih brojeva informacija [36]. Kompatibilni dio standarda vrlo je ograničen i nije otvoren za buduća proširenja koja se mogu provesti generičkim pristupom definiranim u standardu i unutar privatnih adresnih polja proizvođača. Upravo to ograničenje glavni je nedostatak standarda [36]. Standard definira dva fizička sloja:

- RS 485 bus,
- optičko vlakno s 19,2 kBd.

Niska brzina prijenosa podataka i neuravnoteženo primijenjeno načelo glasa daljnji su nedostaci. Međutim, budući da je CDV objavio ovaj standardni protokol 1995. godine, koristi se u nekoliko desetaka tisuća trafostanica diljem svijeta [36].

### 4.3. Standardna serija IEC 61850

Standardni niz IEC 61850 nudi više od definicije komunikacijskog protokola. Temelj tražene fleksibilnosti položen je na razvoj referentnog modela standarda koji je prikazan na slici 4.6. [37].



**Slike 4.6.** Referentni model IEC 61850 [37]

Glavna je ideja odvajanje rješenja sa značajkama dugoročne stabilnosti te brzim promjenama komunikacijskih tehnologija. Osnovne primjene mrežnih operacija bit će održane u budućnosti, ali mogu zatražiti proširenja. Brz napredak može se promatrati u razvoju informacijskih i komunikacijskih tehnologija [37].

Referentni model standardnog IEC 61850 konstruiran je da osigura zatražen [37]:

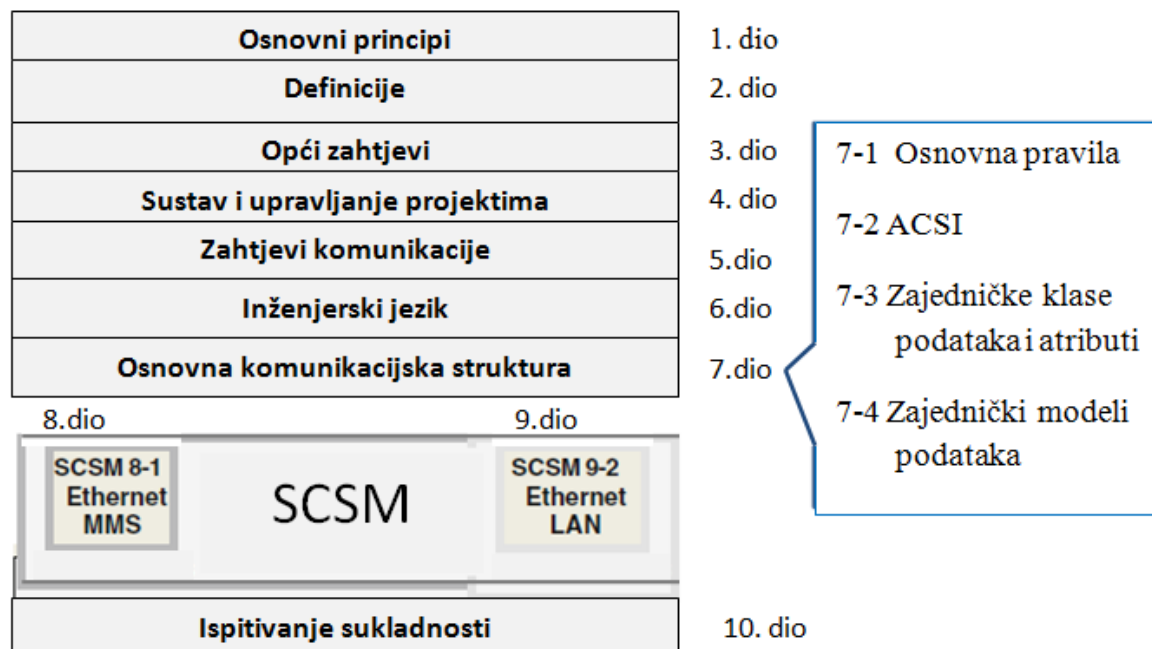
- stabilan temelj za osnovne primjene uz fleksibilna proširenja,
- veliku fleksibilnost u primjeni novih komunikacijskih tehnologija.

Programi za upravljanje mrežom zahtijevaju definiranje traženih podataka, njihovo modeliranje i odgovarajuće komunikacijske usluge. Standard definira te stavke u sučelju sažetka komunikacije (eng. *Abstract Communication Service Interface* - ACSI). Specifično mapiranje komunikacijskih usluga (eng. *The Specific Communication Service Mapping* - SCSSM) pruža mogućnost kombiniranja podatkovnih modela i usluga ACSI-a s najsuvremenijim komunikacijskim tehnologijama koje se koriste unutar ISO / OSI protokola [37].

Standardni serijski broj IEC 61850 podržava opći pristup povezujući praksu rada električne mreže s komunikacijskom arhitekturom. Sljedeći aspekti razmatraju se i definiraju u zasebnim dijelovima standarda [37]:

- aspekti sustava u upravljanju u cjelini,
- napredne komunikacijske usluge,
- generički modeli podataka,
- mapiranje do stvarnih komunikacijskih mreža,
- inženjerski proces,
- ispitivanje sukladnosti i puštanja u pogon.

Struktura prvog izdanja IEC 61850 prikazana je na slici 4.7. Ta struktura odnosi se na komunikacijske poslove u trafostanicama, što je bio početni cilj standardnog razvoja [37]. Aspekti sustava sadržani su u dijelovima 1, 2, 3, 4 i 5 [37].



Slika 4.7. Struktura IEC 61850 [37]



Prvi dio daje uvod i pregled standardne serije, drugi dio sadrži definicije i glosar, u trećem dijelu detaljniji su opći zahtjevi, dok je četvrti dio razvijen kako bi podržao inetropabilnost IED-a, a ne samo s komunikacijske točke gledišta i vezano uz upravljanje imovinom i kompatibilnost IED proizvoda tijekom i nakon njihovog životnog vijeka [37].

Nadalje, peti dio bavi se zahtjevima komunikacije za funkcije i relevantne IED modele. Jedan od ciljeva standardnog IEC 61850 pojednostavljenje je inženjerstva i prilika za podršku neovisnom proizvođaču, zbog čega se jezik za konfiguraciju trafostanice temeljen na XML-u razvija i definira u šestom dijelu standarda. XML je definicija jezika koja je razumljiva za ljude i računala [37].

Sedmi dio opisuje objektivno orijentiranu izgradnju podatkovnog modela i komunikacijske usluge te je strukturiran u četiri poglavlja koja naglašavaju važnost i veličinu traženih informacija za postizanje ineroperabilnosti [37]. Prvo poglavlje u sedmom dijelu definira komunikacijske principe i zahtjeve koji se odnose na modele podataka. Ti principi provode osnovna pravila za ASCI koja su definirana u drugom poglavlju. Model podataka zahtijeva zajedničke klase podataka (*eng. Common Data Classes - CDC*) koje ne definiraju podatke koji opisuju složeni upravljački mehanizam, izmjenu vrijednosti ili druge. CDC definira odnos između atributa podataka i funkcionalnog ograničenja. Struktura CDC-a djelomično je naslijeđena od tipova definiranih u standardu IEC 60870-5-101 [37]. Skup atributa dodijeljenih podacima definiran je i u 3. poglavlju sedmog dijela. Atributi su definirani kao obavezni ili neobavezni. U četvrtom poglavlju navedena je definicija modela podataka [37].

Osmi dio opisuje trenutno dostupan SCSM sabirnice na temelju specifikacije izrade proizvoda (*eng. Manufacturing Message Specification - MMS*) za aplikacijski sloj. Deveti dio nudi SCSM-ove za primjenu procesnih sabirnica i definira komunikaciju svih *online* podataka koji se razmjenjuju između zaljeva IED-a i razine proces putem serijskih *Ethernet* veza. Kao posljednji, deseti dio definira pravila i instrumente za ispitivanje sukladnosti protokolima [37].

Svaki IED koji služi kao sastavni dio sustava automatizacije postrojenja mora osigurati interoperabilnost temeljenu na [37]:

- dostupnom podatkovnom modelu koji odgovara dijelovima 7-1, 7-3 i 7-4,
- načelu razmjene podataka u skladu s dijelovima 7-1 i 7-2,
- relevantnoj specifičnoj mapi komunikacijskih usluga s dijelovima 8-1 i 9-2.

### 4.3.1. Struktura komunikacijske usluge

Struktura komunikacijske usluge IEC 61850 nudi dva opća načela komunikacije, gdje se drugo načelo koristi za dvije različite metode primjene [37]:

- načelo klijent-poslužitelj,
- izdavač-pretplatnik koji služi *multicast* hitnih poruka pomoću Generičkog objekta orijentiranog događaja trafostanice (*eng. Generic Object Oriented Substation Event - GOOSE*) te prijenos uzorkovanih vrijednosti (*eng. Sampled Values - SV*).

IEC 61850 nudi usluge triju različitih vrsta protokola na jednom *Ethernet busu*. Princip klijenta i poslužitelja osigurava razmjenu informacija između klijenta i poslužitelja i primjenjuje se za tipične aplikacije za automatizaciju postrojenja (*eng. Substation Automation System - SAS*), kao što su kontrola i nadzor nad opremom za trafostanicu, prijenos izvješća o događajima, podatkovni zahtjevi, postavke podataka, sinkronizacija vremena, pohranjivanje i dohvaćanje sekvenci događaja te prijenos datoteka [37].

Izrazito vremenski kritična razmjena informacija koristi GOOSE princip za brzi prijenos unutar milisekundi. Ovdje IED djeluje kao izdavač koji omogućuje razmjenu hitnih informacija odmah nakon pojave konfiguriranog događaja. Prijenos poruke događaja ima najveći prioritet, a primaju ga svi pretplatnici definirani u procesu inženjerstva. Klijent ili poslužitelj mogu biti izdavači ili pretplatnici za različite događaje. Takvi vremenski kritični podaci mogu biti podizanje zaštite IED-a, prekid prekidača strujnih krugova ili statusne promjene svih vrsta prekidača za međusobno povezivanje [37]. GOOSE mehanizam ne primjenjuje sekvence potvrde. Međutim, iz sigurnosnih razloga, *multicast* se može ponoviti u kratkim vremenskim intervalima. Načela komunikacije ACSI-a prikazana su indikacijom komunikacijske usluge i veze između IED-ova [37].

IEC 61850 osigurava odgovarajući skup modela usluga za razmjenu informacija, a upravljanje informacijama uključuje sljedeće usluge:

poslužitelj klijenta:

- čitanje i pisanje podataka,
- stvaranje ili brisanje skupova podataka,

- zamjenski podaci,
- spontani prijenos podataka,
- postavljanje skupina,
- usluge imenika i ispitivanja.

izdavač-pretplatnik:

- brzi prijenos događaja - *multicasting* GOOSE,
- prijenos uzorkovanih vrijednosti.

#### **4.4. Referentni model IEC/TR 62357**

Koncept pametne mreže ima utjecaj na sve dionike procesa opskrbe električnom energijom [38]:

- mrežni operatori na svim razinama elektroenergetskog sustava,
- mali proizvođači i skupno napajanje,
- trgovci i davatelji usluga,
- tradicionalni potrošači,
- potrošači koji koriste nove vrste tereta koji zahtijevaju specifične uvjete.

Svi ti dioničari zahtijevaju niz dosljednih standarda kako bi se osiguralo održavanje visoke kvalitete napajanja, također pod uvjetima pametne mreže. Preko 100 IEC standarda identificirano je kao relevantno za pametnu mrežu [38].

Značajan dio tih standarda pripada području informacijskih i komunikacijskih tehnologija. Pametne mreže zahtijevaju razmjenu mogućnosti koje će omogućiti novim dizajnom mrežne opreme i novim ICT tehnologijama uspješno opremanje postojeće, tradicionalne mrežne opreme i ICT rješenja u radu [39].

U tom kontekstu, kontinuirana podrška "starijih" komunikacijskih standarda u svijetu vrlo je važna i ne smije se zanemariti [39]. Tehnički odbor IEC-a TC 57 izradio je tehničko izvješće

koje opisuje sve postojeće modele objekata, usluge i protokole koji igraju ključnu ulogu pametne mreže i pokazuju kakav je međusobni odnos [39].

IEC/TR 62357-1:2012 navodi referentnu arhitekturu i okvir za razvoj i primjenu IEC standarda za razmjenu podataka koji obuhvaćaju sve razine elektroenergetskog sustava, počevši od građevinskih mreža do veleprodajnih tržišta električne energije i kontrolnih područja operatora prijenosnog sustava [39].

Ovaj referentni model sadrži sve temeljne ICT standarde i osigurava dodjelu pripadajućih dijelova na njihove razine primjene. Uz sustavnu raspodjelu ICT standarda, mostovi na druge domene predstavljeni su kao:

- primjena zrelih ISO i industrijskih standarda za pokrivanje modela komunikacijskih standarda sa sedam slojeva,
- mehanizmi specifikacija među sustavima kao što su XML i RDF,
- preslikavanje na druge tehnologije,
- međusobni odnosi s drugim tehničkim odborima.

Na taj je način predstavljena strategija koja uzima u obzir gdje su potrebni uobičajeni modeli te preporučuje moguće načine usklađivanja različitih pristupa modeliranju. Rad na referentnom modelu i dalje se nastavlja te poboljšana referentna struktura planira biti u skladu s pametnom mrežom modela SGAM koji pruža metodu predstavljanja aspekata sustava pametne mreže [39].

## 5. ZAKLJUČAK

Pametna mreža elektroenergetska je mreža koja inteligentno može integrirati akcije svih korisnika koji su priključeni na nju, od generatora i potrošača pa do onih koji rade oboje kako bi se učinkovito pružile održive, ekonomske i sigurne zalihe električne energije. Pametne mreže omogućuju razvoj novih usluga i servisa kao što je npr. elektrifikacija cestovnog transporta te imaju sposobnost upravljanja dvosmjernim protokom električne energije i informacijama kako bi se optimizirale opskrba i potražnja. S druge strane, tradicionalne električne mreže imaju jednosmjernu komunikaciju između komunalnih usluga i kupaca, tj. imaju jednosmjerni tok informacija od korisnika do mreže i jednosmjerni tok energije iz mreže do korisnika. Pametna mreža pokušaj je implementacije informacijskih i komunikacijskih tehnologija (ICT) na energetska mrežu radi rješavanja problema nestabilnosti zbog obnovljivih izvora energije. Također, pametna mreža omogućava sudjelovanje klijenata u primjenama kao što su diferencijalna cijena i odgovor na potražnju. Komunikacije za sigurno očuvanje privatnosti presudne su za operacije pametne mreže. Učinkovitost arhitekture ICT sustava zahtijeva da svi moduli budu oblikovani u skladu s jedinstvenim, otvorenim i globalno prihvaćenim standardima. Razvoj odgovarajućih komunikacijskih standarda započeo je 1980. godine i još uvijek je u tijeku, a razvoj standardnih komunikacijskih protokola imao je dubok utjecaj na arhitekturu i performanse SCADA sustava, čiji je razvoj bio praćen i potaknut razvojem odgovarajućih serijskih komunikacijskih protokola. Krajem sedamdesetih godina, vodeći proizvođači SCADA sustava uveli su svoje specifične vlasničke protokole, kao što su Sinaut, Telegyr, Indactic i DNP za komunikaciju između trafostanica i kontrolnih centara. Ostali protokoli, osim standarda IEC protokola, stekli su važnost za standarde u posebnim regijama ili područjima primjene. Protokoli Modbus i DNP3.0 dobro su raspoređeni u Sjevernoj Americi, a Profibus se često primjenjuje u industrijskim mrežama kako bi se osigurala kompatibilnost s komunikacijom koja se koristi za proizvodne procese. Standardni niz IEC 61850 nudi više od definicije komunikacijskog protokola. Temelj tražene fleksibilnosti položen je na razvoj referentnog modela standarda. Glavna je ideja IEC 61850 odvojiti rješenja sa značajkama dugoročne stabilnosti, na jednoj strani, i brzim promjenama komunikacijskih tehnologija s druge strane. Osnovne primjene mrežnih operacija bit će održane u budućnosti, ali mogu zatražiti proširenja.

## LITERATURA

- [1] European technology platform Smart Grids,  
<http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf> (lipanj, 2017.)
- [2] Strategic deployment document October 2008,  
[http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids\\_SDD\\_FINAL\\_APRIL2010.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf)  
(lipanj, 2017.)
- [3] I., Novosel, D., Žigman: Smart Grids - Napredne elektroenergetske mreže ,Zagreb, 2016
- [4] Hrastović inženjering d.o.o. : <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/energijske-tehnologije/item/301-smart-energetska-mreza.html>  
(lipanj, 2017)
- [5] M., Lott, T., Seaman, C., Upshaw : The smart grid in texas: a primer.  
<https://www.sgiclearinghouse.org/BusinessCases> (lipanj, 2017.)
- [6] International Energy Agency : [http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf)  
(lipanj, 2017.)
- [7] U.S. department of energy, Washington DC :  
[http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain\\_090707\\_lowres.pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_090707_lowres.pdf)  
(lipanj, 2017. )
- [8] The electricity advisory committee, U.S. department of energy:  
<http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/final-smart-grid-report.pdf>  
(lipanj, 2017.)
- [9] World Energy Council, London:  
[http://www.worldenergy.org/documents/20121006\\_smart\\_grids\\_best\\_practice\\_fundamentals\\_for\\_a\\_modern\\_energy\\_system.pdf](http://www.worldenergy.org/documents/20121006_smart_grids_best_practice_fundamentals_for_a_modern_energy_system.pdf) (lipanj, 2017.)
- [10] The United States department of energy, Washington DC, 2008. :  
<http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/ConsumerAdvocates.pdf>  
(lipanj, 2017.)
- [11] Computer Networks and Security Lab (2013)  
<http://cnslab.snu.ac.kr/twiki/bin/view/Main/Research> (lipanj, 2017)
- [12] HD PLCMAG (2011) HD-PLC Alliance : <http://hd-plc.org> (lipanj, 2017.)

- [13] Myles P., Electric power system asset optimization DOE/NETL-430/061110, 7 Mar 2011  
<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Energy%20Analysis/Publications/ElecAssetOptRep.pdf> (lipanj, 2017)
- [14] NIST (2010) NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards. Release1.0, NIST Special Publication 1108
- [15] Wu FF, Moslehi K, Bose A (2005) Power system control centers: past, present and future. Proc IEEE 91(11):1890–1908
- [16] Ree JDL, Centeno V, Thorp JS, Phadke AG (2010) Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems
- [17] National Energy Technology Laboratory ,US department of energy, 2007:  
[https://www.smartgrid.gov/sites/default/files/pdfs/a\\_systems\\_view\\_of\\_the\\_modern\\_grid.pdf](https://www.smartgrid.gov/sites/default/files/pdfs/a_systems_view_of_the_modern_grid.pdf)  
(lipanj, 2017.)
- [18] Xu J, Wen MHF, Li VOK, Leung KC: Optimal PMU placement for wide-area monitoring using Chemical Reaction Optimization, 2013
- [19] Varaiya PP, Wu FF, Bialek JW :Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch, 2011
- [20] Kempton W, Tomic J (2005) Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. J Power Sources 144(1):268–279
- [21] Hui SY, Lee CK, Wu FF: Electric springs—a new smart grid technology, 2012.
- [22] Rahimi F., Ipakchi A. : Demand response as a market resource under the smart grid paradigm, 2010.
- [23] Wen MHF, Leung KC, Li VOK :Communication-oriented smart grid framework. Proceedings of IEEE international conference on smart grid communications, Brussels, Belgium, 2010.
- [24] Jin T, Mechehoul M : Ordering electricity via internet and its potentials for smart grid systems, 2010.
- [25] Gellings, C. : Smart power delivery: a vision for the future. EPRI J 9, 2003.
- [26] Meserve, J. :Smart grid may be vulnerable to hackers, 2009.
- [27] Clemente, J.: The security vulnerabilities of smart grid, 2009.
- [28] Li VOK, Wu FF, Zhong, J. :Communication requirements for risk-limiting dispatch in smart grid, Cape Town, South Africa, 2010.
- [29] Khurana, H., Hadley, M., Lu, N., Frincke, DA. :Smart-grid security issues, 2010.
- [30] Liu, Y., Ning, P., Reiter, MK.: False data injection attacks against state estimation in electric power grids, 2009.

- [31] Chan, CB., Chim, TW., Yiu, SM., Li, VOK., Hui, LCK.: Smart meter obfuscation and attestation using non-deterministic execution sequence, 2013.
- [32] King, C.: Smart meter security: the human element, 2012. : <http://gigaom.com/cleantech/smart-meter-security-the-human-element> (lipanj, 2017.)
- [33] Chim, TW., Yiu, SM., Hui, LCK., Li, VOK.: Privacy preserving advance power reservation, 2012.
- [34] B. M. Buchholz, Z. Styczynski: Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, 2014.
- [35] IEC 60870-5-101: 1995, Telecontrol equipment and systems – Part 5: Transmission protocols – Section 101: Companion standard for basic telecontrol tasks.
- [36] IEC 60870-5-103: 1997, Telecontrol equipment and systems – Part 5: Transmission protocols– Section 103: Companion standard for the informative interface of protection equipment.
- [37] IEC 61850-n, Communication networks and systems for power utility automation
- [38] IEC 61968-n: Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management
- [39] IEC/TR 62357: Power systems management and associated information exchange Part 1, 2012: Reference architecture



## **POPIS I OPIS UPOTRIJEBLJENIH KRATICA**

AMI - Advanced Metering Infrastructure

ASDU - Application Service Data Unit

BEMS - Building Energy Management Systems

CDC - Common Data Classes

CDV - Committee Draft for Voting

CIM - Common Information Model

DDoS - Distributed Denial of Service

DER - Distributed Energy Resource

DMS - Distribution Management Systems

DNO - Distribution Network Operator

EMS - Energy Management System

EPM - Enterprise Process Management

GIS - Geographical Information System

GOOSE - Generic Object Oriented Substation Event

GPS - Global Positioning System

HEMS - Home Energy Management Systems

HV - High-Voltage

ICT - Information and Communications Technology

IEC - International Electrotechnical Commission

IED - Intelligent electronic device

IIDS - Improved Interfaces and Decision Support

IP - Internet Protocol

ISO - International Organization for Standardization

MMS - Manufacturing Message Specification

MV - Medium-Voltage

NETL - National Energy Technology Laboratory

NIST - National Institute of Standards and Technology

OSI - Open Systems Interconnection

PLC - Power Line Carrier

PMU - Phasor Measurement Unit

QoS - Quality of Service

RDF - Resource Description Framework

RTU - Remote Terminal Units

SAS - Substation Automation System

SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition

SGAM - Smart Grid Architecture Model

SV - Sampled Values

TC - Technical Committee

TCP - Tele-communication Protocol

VPN - Virtual Private Network

WAMCN - Wide-Area Monitoring and Control Network

WAMS - Wide-Area Measurement Systems

WAN - Wide Area Network

XML - Extensible Markup Language

## SAŽETAK

Svrha je i glavni cilj ovog završnog rada najprije objasniti pojam pametne mreže, zatim navesti zašto se koriste, na koji način funkcioniraju te navesti njihove prednosti i nedostatke, zbog kojih i postoje različiti komunikacijski sustavi. Nakon općenitog dijela o pametnim mrežama, slijedi glavna razrada rada. Najprije je rečeno što je to komunikacijski dio mreže, a zatim i koji su ciljevi, tj. vizije pametnih mreža. Nakon ciljeva pametne mreže dolazi okvir za pametnu mrežu usmjeren na komunikaciju. Tu će biti rečeno što je to NIST okvir za pametnu mrežu sa sedam domena, od kojih je svaka detaljnije objašnjena. Nadalje, spominje se što je to trostruki okvir za komunikaciju pametne mreže i detaljnije je objašnjen svaki subjekt trostrukog okvira. Nakon toga dolaze komunikacijski sustavi koji se najprije definiraju, a zatim se navodi na principu koje tehnologije funkcioniraju. Posljednje poglavlje govori o standardima komunikacijskog sustava, nakon čega se opisuju digitalni komunikacijski protokoli, zajedno sa svim prednostima i nedostacima.

### KLJUČNE RIJEČI:

pametna mreža, komunikacijski dio pametne mreže, komunikacijski sustavi, standardi, protokoli

## **ABSTRACT**

The main purpose of this final work is to explain the concept of a Smart Grid, why is it used, how it works and to indicate the advantages and disadvantages of the Smart Grid and because of these shortcomings there are various communication systems. Following the general part about Smart Grids, the main work is followed. To begin with, it will be said what is the communication part of the network and then what are the goals i.e. the vision of Smart Grids. After Smart Grids goals comes a framework of the Smart Grid for communication. In this part it will be said about NIST framework for the Smart Grid with seven domains, each of which is explained in more detail. Furthermore, it is mentioned what a triple framework for Smart Grid communication is and every single triple-frame entity is explained in more details. After that, communication systems are first defined, and then the principle on which technologies it works. The last chapter discusses the standards of the communication systems, after which digital communication protocols are described, together with all the advantages and disadvantages.

### **KEYWORDS:**

Smart Grid, communication part of Smart Grid, communication system, standards, protocols

## **ŽIVOTOPIS**

Matija Skelo rođen je 19. rujna 1995. godine u Zagrebu. Završio je osnovnu školu Zvonimira Franka u Kutini, nakon čega je upisao Tehničku školu Kutina. Maturirao je 2014. godine i upisao preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek, koji danas nosi naziv Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.