



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Mita Čokić

**UPRAVLJANJE KOMUNIKACIONOM
MREŽOM ELEKTROENERGETSKE
PAMETNE MREŽE SA PROMENLJIVIM
KOMUNIKACIONIM ZAHTEVIMA**

Doktorska disertacija

Mentor: prof. dr Dragan Popović

Novi Sad 2020



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Мита Чокић
Ментор, МН:	проф. др Драган Поповић
Наслов рада, НР:	Управљање комуникационом мрежом електроенергетске паметне мреже са променљивим комуникационим захтевима
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина, Нови Сад
Година, ГО:	2020
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/110/96/4/28/0/0
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Примењени софтверски инжењеринг
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Рачунарске мреже, паметне мреже, квалитет услуге, програмске рачунарске мреже
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН-а, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Важна напомена, ВН:	



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Извод, **ИЗ:**

Паметна електроенергетска мрежа представља мрежу нове генерације која треба да буде ефикасна, проширива, поуздана и једноставна за управљање. Паметну мрежу карактерише велики број уређаја и двосмерна комуникација са њима. Ови уређаји ће генерисати огромне количине података које је потребно прочитати и транспортовати до контролног центра, за шта је неопходна одговарајућа комуникациона инфраструктура која обезбеђује адекватан квалитет услуге. У овој дисертацији је приказано решење за обезбеђивање квалитета услуге сабраћаја са динамичким променама приоритета и пропусног опсега базирано на програмабилним рачунарским мрежама. Такође је развијена платформа за евалуацију комуникационе инфраструктуре паметних мрежа како би се омогућило једноставније емулирање различитих мрежних топологија за потребе развоја нових алгоритама управљања. Перформансе решења су потврђене путем шест тестних сценарија и показано је да представљено решење даје боље резултате за све сценарије са аспекта обезбеђивања пропусног опсега и мрежног кашњења.

Датум прихватања теме, **ДП:**

Датум одбране, **ДО:**

Чланови комисије, **КО:**

Председник:

Ред. проф. др Душко Бекут

Члан:

Ред. проф. др Александар Ердељан

Члан:

Ред. проф. др Јелица Протић

Члан:

Ван. проф. др Дарко Чапко

Члан, ментор:

Ред. проф. др Драган Поповић

Потпис ментора



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed document
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Mita Cokic
Mentor, MN :	Dragan Popović, Ph. D., Full professor
Title, TI :	Smart grid communication network management with variable communication requirements
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina, Novi Sad
Publication year, PY :	2020
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/110/96/4/28/0/0
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Applied software engineering
Subject/Key words, S/KW :	Computer networks, smart grid, quality of service, software defined networks
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	Smart grid represents the next generation power network which should be efficient, extensible, reliable and easy to manage. The smart grid will have a great number of devices with two-way communication. These devices will generate large amount of data that needs to be read and transported to utility control center, which further requires adequate communication infrastructure with appropriate quality of service. This dissertation presents a solution for providing quality of service for traffic with dynamic priority and bandwidth requirements, based on software defined networks. The platform for smart grid communication infrastructure evaluation is developed to enable easy emulation of different network topologies for the purpose of developing new control algorithms. Solution performance is verified using six test scenarios and it is shown that the proposed solution gives better results for all scenarios from the aspect of bandwidth provision and network latency.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Defended on, **DE**:

Defended Board, **DB**:

President:	Full professor PhD Dusko Bekut
Member:	Full professor PhD Aleksandar Erdeljan
Member:	Full professor PhD Jelica Protic
Member:	Assistant professor PhD Darko Capko
Member, Mentor:	Full professor PhD Dragan Popović

Mentor's sign

Образац **Q2.НА.06-05**- Izdanje 1

Zahvalnica

Doktorsku disertaciju posvećujem svojim roditeljima, majci *Jelici* i ocu *Milanu* koji su zaslužni za moje vaspitanje, školovanje i usmeravanje u prethodnih 35 godina. Zahvalan sam im što na tom dugom i napornom putu nisu posustali čak i kada mi se ta borba činila uzaludnom. Zahvaljujem bratu *Stevanu* na pomoći prilikom izrade disertacije.

Posebnu zahvalnost dugujem mentoru *prof. Draganu Popoviću* koji je vodio računa da, tokom mog kompletnog školovanja na doktorskim studijama i stručnog usavršavanja, steknem znanja iz projektovanja i razvoja kritičnih infrastrukturnih sistema što je zaokruženo ovom doktorskom disertacijom. Zahvaljujem mu na svim savetima, pomoći i pruženom poverenju.

Veliku zahvalnost dugujem *Ivanu Šeškaru*, koji me je uveo u polje upravljanja računarskim mrežama, na dugoj i nesebičnoj pomoći tokom izrade disertacije, kao i vođstvu i trudu u mom naučnom i istraživačkom radu. Takođe mu zahvaljujem na pristupu WINLAB laboratoriji na Ratgers univerzitetu u Nju Džersiju.

Zahvaljujem *dr Nevenu Kovačkom* i *Tomislavu Kovaču* na savetima prilikom izrade disertacije.

I na kraju, želim da zahvalim supruzi *Tanji*, mojoj najvećoj podršci da ne posustanem i omogućila mi da se posvetim doktorskim studijama i radu na disertaciji. Zahvaljujem ćerci *Anđeliji* i sinovima *Milanu* i *Bogdanu* na razumevanju i strpljenju za vreme izrade disertacije.

Rezime

Pametna elektroenergetska mreža predstavlja mrežu nove generacije. Očekuje se da bude efikasna, proširiva i jednostavna za upravljanje. Pametnu mrežu karakteriše veliki broj uređaja kao i dvosmerna komunikacija sa njima kako bi se mogle razvijati napredne aplikacije operacionih tehnologija (engl. *Operation Technology, OT*). Da bi se ispunila visoka očekivanja, neophodna je odgovarajuća komunikaciona infrastruktura. Veliki broj uređaja će generisati ogromnu količinu podataka koju je potrebno pročitati i transportovati do kontrolnog centra. Neophodno je obezbediti odgovarajući kvalitet usluge. Podaci koji se transportuju imaju određen prioritet i propusni opseg, a oba se mogu menjati u zavisnosti od stanja elektroenergetske mreže. U ovoj disertaciji je prikazano rešenje za obezbeđivanje kvaliteta usluge saobraćaja sa dinamičkim promenama prioriteta i propusnog opsega. Rešenje je bazirano na programabilnim računarskim mrežama (engl. *Software Defined Networks, SDN*), u cilju upravljanja komunikacionom infrastrukturom pametne elektroenergetske mreže. Takođe je razvijena platforma za evaluaciju komunikacione infrastrukture pametnih mreža kako bi se omogućilo jednostavnije emuliranje različitih mrežnih topologija za potrebe razvoja novih algoritama upravljanja. Performanse rešenja su potvrđene putem šest scenarija: (1) izvršavanje aplikacije za regulaciju učestalosti i aktivnih snaga (engl. *Automatic Generation Control, AGC*), (2) analiza mrežnog saobraćaja koji se prenosi preko protokola za kontrolu prenosa (engl. *Transmission Control Protocol, TCP*) prilikom izvršavanja AGC OT aplikacije uz konstantno opterećenje mreže, (3) izvršavanje OT aplikacije za Volt/Var optimizaciju (VVO) uz konstantno opterećenje mreže, (4) uticaj varijabilnog mrežnog opterećenja na akviziciju podataka sa polja, (5) uticaj konstantnog mrežnog opterećenja na akviziciju podataka sa polja i (6) disagregacija potrošačkih profila prilikom pozadinskog opterećenja mreže. Pokazano je da predstavljeno rešenje daje bolje rezultate za sve scenarije. Ovo je pokazano merenjem kašnjenja komandi kroz mrežu, gubljenjem paketa kao i garantovanjem potrebnog propusnog opsega.

Sadržaj

Zahvalnica	7
Rezime	9
Sadržaj	11
Spisak slika	13
Spisak tabela.....	15
Spisak listinga.....	17
Spisak skraćenica	19
1. Uvod.....	21
1.1. Definicija pametne mreže.....	21
1.2. Problemi u pametnim mrežama.....	22
1.3. Problem obrađen u disertaciji	23
1.4. Postavka problema	25
2. Pregled literature.....	31
3. Pametne mreže.....	35
3.1. Aplikacije operativnih tehnologija za pametne mreže	37
3.1.1. Akviziciono upravljački sistem	38
3.1.2. Regulacija učestalosti i aktivnih snaga.....	38
3.1.3. PMU koncentrador podataka.....	38
3.1.4. Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom	39
3.1.5. Upravljanje potrošnjom.....	39
3.1.6. Infrastruktura za pametna brojila.....	40
3.1.7. Sistem za upravljanje otkazima	40

3.2. Komunikaciona infrastruktura za pametne mreže	41
3.3. Komunikacioni protokoli u pametnim mrežama	46
3.4. Kvalitet usluge	51
4. Programski definisane mreže	53
5. Dizajn i implementacija rešenja.....	57
5.1.1. Algoritam za dinamičko prioritetizovanje	58
5.2. Implementacija kontrolera	60
6. Platforma za evaluaciju rešenja.....	65
6.1. Konfiguracija okruženja	68
6.2. Izvršavanje testova	68
6.3. Generatori saobraćaja	70
6.4. Sakupljač rezultata.....	74
7. Test rezultati.....	77
8. Zaključak	97
Literatura	101
Biografija i bibliografija autora	109
Biografija.....	109
Bibliografija.....	110

Spisak slika

Slika 1: Ilustracija propusnog opsega prilikom opterećenja sa QoS i bez njega.....	27
Slika 2: Arhitektura pametne mreže[8]	37
Slika 3: Primer komunikacione arhitekture pametne mreže [8]	43
Slika 4: Primer komunikacionih tehnologija u pametnim mrežama	45
Slika 5: Mrežna topologija za ilustraciju kontrole zagušenja.....	49
Slika 6: Ilustracija uticaja kontrole zagušenja na propusni opseg	50
Slika 7: SDN arhitektura.....	54
Slika 8: Interakcija između komponenti rešenja.....	61
Slika 9: Arhitektura platforme za evaluaciju.....	66
Slika 10: (a) Primer komunikacione topologije, (b) Raspoređivanje Mininet čvorova	67
Slika 11: Primer CSV datoteke za generator saobraćaja.....	70
Slika 12: Primer generisanog saobraćaja na osnovu CSV datoteke.....	71
Slika 13: Dijagram sekvenci generatora saobraćaja komandi	72
Slika 14: Wireshark isečak	73
Slika 15: Korišćenje SGSDNC direktno sa SDN svičevima	75
Slika 16: UML dijagram SGCEP.....	76
Slika 17: Mapa gradova od interesa i primer komunikacione topologije.....	80
Slika 18: Testna topologija mreže.....	81
Slika 19: Vreme izvršavanja 120 AGC komandi	83
Slika 20: Prosečno komunikaciono vreme po komandi.....	83
Slika 21: Mini-topologija komunikacione mreže	84
Slika 22: Rezultati merenja broja komandi i TCP statistike	85
Slika 23: Poređenje veličine prozora zagušenja.....	87
Slika 24: VVO testni rezultati	89
Slika 25: Prosečno komunikaciono vreme po komandi [ms].....	90
Slika 26: Rezultati merenja uticaja varijabilnog opterećenja na akviziciju podataka.....	92
Slika 27: Rezultati merenja uticaja konstantnog opterećenja na akviziciju podataka	94
Slika 28: AMI potrošnja propusnog opsega.....	96

Spisak tabela

Tabela 1: Korišćene tehnologije po segmentima mreže	42
Tabela 2: AMI saobraćaj u KBps	78
Tabela 3: Estimirani broj potrošača po oblastima	79
Tabela 4: Rezultati merenja	86

Spisak listinga

Listing 1: Definicija OFPT_FLOW_MOD poruke	62
Listing 2: Definicija ofp_match strukture	63
Listing 3: Komande koje podržava ofp_flow_mod poruka	63
Listing 4: Definicija ofp_action_enqueue strukture	64

Spisak skraćenica

Skraćenica	Engleski termin	Srpski termin
AGC	<i>Automatic Generation Control</i>	Regulacija učestalosti i aktivnih snaga
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>	Infrastruktura za pametna brojila
BN	<i>Backhaul network</i>	Prihvatna mreža
CAIDA	<i>Center for Applied Internet Data Analysis</i>	Centar za primenjenu analizu internet podataka
CN	<i>Core Network</i>	Mreža elektroenergetskog preduzeća
CSV	<i>Comma Separated Values</i>	Vrednosti razdvojene zarezima
DMS	<i>Distribution Management System</i>	Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom
DR	<i>Demand Response</i>	Upravljanje potrošnjom
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>	Uređaj za pristup digitalnoj pristupnoj liniji
EES	<i>Electrical Power System</i>	Elektroenergetski sistemi
FLISR	<i>Fault Location, Isolation and Supply Restoration</i>	Lociranje i izolacija kvara i restauracija napajanja
HAN	<i>Home Area Network</i>	Kućna mreža
IP	<i>Internet Protocol</i>	Internet protokol
ISM	<i>Industrial, scientific and medical radio band</i>	Industrijski, naučni i medicinski radio opseg
ISP	<i>Internet Service Provider</i>	Pružalac internet usluge
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>	Usmeravanje paketa na osnovu oznake protokola
NAN	<i>Neighbor Area Network</i>	Mreža u komšiluku
OF	<i>OpenFlow</i>	OpenFlow protokol
OMS	<i>Outage Management System</i>	Sistem za upravljanje otkazima
OT	<i>Operation Technology</i>	Operacione tehnologije

PLC	<i>Power Line Communication</i>	Komunikacija preko strujnih vodova
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>	Uređaj za sinhronizovano merenje fazora
RTU	<i>Remote Telemetry Unit</i>	Udaljena telemetrijska jedinica
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	Akviziono-upravljački sistem
SDN	<i>Software Defined Network</i>	Programski definisana mreža
SG	<i>Smart Grid</i>	Pametna elektroenergetska mreža
SGCEP	<i>Smart Grid Communication Evaluation Platform</i>	Evaluaciona platforma komunikacione infrastrukture za pametne mreže
SGSDNC	<i>SmartGrid SDN Controller</i>	SDN kontroler za pametne elektroenergetske mreže
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	Protokol za kontrolu prenosa podataka
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>	Protokol za prenos korisničkih datagrama
VVO	<i>Volt/Var Optimization</i>	Volt/Var optimizacija

1. Uvod

Potrošnja električne energije u svetu raste, [1] što se jasno vidi na primeru Kine gde je potrošnja u poslednjih 25 godina porasla deset puta [1]. Energetski sistemi koji su razvijani u prethodnom veku teže zadovoljavaju rastuće potrebe potrošača. U narednom periodu je planirano da postojeći elektroenergetski sistemi budu unapređeni podizanjem na nivo pametnih mreža (*Smart Grid*)[2]–[5].

1.1. Definicija pametne mreže

Postoji mnogo različitih definicija pametne mreže, a u ovoj disertaciji izdvojene su dve. Prva je citirana u knjizi [6], a definisana od strane Evropske tehnološke platforme:

„Pametna mreža je električna mreža koja inteligentno integriše akcije svih korisnika koji su na nju povezani – generatori, potrošači i oni koji su oba da bi se efikasno isporučila održiva, ekonomična i bezbedna električna energija.“ [6]

Druga se takođe može naći u knjizi [6], a definisala ju je Međunarodna organizacija za standardizaciju IEC:

„Pametna mreža integriše električne i informacione tehnologije između bilo koje tačke proizvodnje i bilo koje tačke potrošnje.“ [6]

Pametne mreže treba da pruže pouzdano, sigurno, ekonomično, proširivo i održivo rešenje koje može da odgovori kako trenutno aktuelnim izazovima tako i onim koje nosi budućnost. Već se može videti da će pametna elektroenergetska mreža uključivati daleko veći broj uređaja: pametna brojila, električna vozila, uređaje za sinhronizovano merenje fazora, uređaje unutar stambenih jedinica itd. Proces transformacije iz tradicionalnog energetskog sistema u pametnu elektroenergetsku mrežu biće dugotrajan i konvergiraće ka tome da se svaki uređaj koji se napaja sa mreže može adresirati kako bi se postigao globalni optimum. Pod pojedinačnim adresiranjem uređaja podrazumeva se mogućnost udaljenog pristupa svakom uređaju u mreži.

Pametna elektrodistributivna mreža će sadržati određen broj OT aplikacija koje omogućuju upravljanje elektroenergetskom mrežom. Broj aplikacija za pametne mreže je veliki, i u budućnosti nesaglediv.

Pametna elektroenergetska mreža podrazumeva dvosmernu komunikaciju između kontrolnog centra i uređaja u mreži. Izvesno je značajno povećanje broja uređaja što će posledično dovesti i do rasta mrežnog saobraćaja [7]. Da bi se omogućio transport tih podataka, potrebna je napredna komunikaciona infrastruktura koja može da zadovolji zahteve potrebne danas, ali i da bude proširiva za uređaje i aplikacije koji će tek biti uvedeni. Komunikacione mreže za elektrodistributivne sisteme su već sada izuzetno složene, što je potvrđeno u izveštaju istraživačke kuće „GMT Research“ [7] – samo 4% ispitanika se izjasnilo da je njihova komunikaciona mreža adekvatna. Ostali se slažu da je njihova mreža kompleksna, razlika je samo u kojoj meri. Većina njih (54%) smatra da ne može bez ulaganja da odgovori na zahteve koje će imati u narednih 2–5 godina, dok tek 18% misli da je spremno za unapređenje pametne mreže.

Svaka aplikacija pametne mreže može potencijalno imati specifične mrežne zahteve: prioritet, propusni opseg i maksimalno dozvoljeno kašnjenje. Veliki broj aplikacija pametnih mreža zahteva odziv u realnom vremenu kao što su [8]: (a) akviziciono upravljački sistem (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA*), (b) sistem za rukovanje otkazima (engl. *Outage Management System, OMS*), (c) sistem za upravljanje distribuiranim energetske resursi i (d) uređaji za sinhronizovano merenje fazora (engl. *Phasor Measurement Unit, PMU*), ili u skoro realnom vremenu – infrastruktura za pametna brojlara (engl. *Advanced Metering Infrastructure, AMI*) [9]. Takođe, postoje podaci koji nisu potrebni u realnom vremenu kao što su: konfiguracioni, istorijski i testni podaci. Važno je da podaci sa terena budu vremenski poravnati [10] – u tom slučaju određene aplikacije mogu biti implementirane na drugačiji način. Na primer, estimacija stanja može biti pročitana sa terena umesto da se koriste nelinearni algoritmi za izračunavanje koji se uglavnom koriste u ovakvim situacijama [10]. Takođe, sa vremenski poravnatim podacima sa terena moguće je izvršavati vremenski poravnate komande na nivou cele mreže [10].

1.2. Problemi u pametnim mrežama

Pametne mreže predstavljaju spoj različitih tehnologija i njihova implementacija sa sobom nosi razne izazove. Problemima i izazovima koje je potrebno adresirati u pametnim mrežama se bavilo više autora [11]–[13], na osnovu čega se može izvesti sledeća podela: (1) regulacioni, (2) socio-ekonomski i (3) tehnološki problemi koje je potrebno rešavati kako bi pametne mreže mogle da donesu benefit koji se od njih očekuje.

Regulacioni problemi podrazumevaju regulaciju funkcionisanja složenog sistema kao što je pametna mreža i nove aspekte koje uvodi – kao što je ulaganje u pametne mreže [14] i formulisanja različitih vrsta standarda.

Socio-ekonomskih aspekata ima puno zato što pametna mreža utiče na mnoge sfere čovekovog života. Neki su [11]:

- Značajno investiranje za koje je bitno motivisati ključne igrače koji mogu da pokrenu ili ubrzaju digitalizaciju mreže.
- Izmene u procesima elektrodistributivnih preduzeća kao što je naplata, tarifna struktura i operaciona strategija.
- Nedostatak razumevanja šire populacije o mogućnostima koje nudi pametna mreža što podrazumeva edukaciju društva kako bi se taj jaz prevazišao.

Tehnološki problemi imaju više dimenzija. Potrebno je razviti napredne OT aplikacije koji će vršiti obradu podataka pametne mreže. Svakako se ne sme zanemariti ni razvoj tehničkih rešenja koja omogućuju prikupljanje podataka sa mreže i upravljanje njome. Na kraju, ostaje i sama modernizacija mreže, odnosno instalacija opreme, nadogradnja upravljačkih aplikacija itd. Bitan aspekt pametne mreže je bezbednost. Bezbednost se u pametnoj mreži odnosi na širok spektar funkcionalnosti kao što su bezbednost same mreže i privatnosti podataka. Rad [11] citira tri cilja digitalne bezbednosti: dostupnost, integritet i poverljivost. Pod dostupnošću se podrazumeva mogućnost pristupa podacima kada je to potrebno, integritet obuhvata zaštitu podataka od neodgovarajućeg formatiranja, izmene i uništavanja podataka dok se pod poverljivošću podataka podrazumeva njihovo čuvanje od nedozvoljenog pristupa [11].

Potrebno je osmisliti adekvatnu komunikacionu infrastrukturu kako bi se omogućila dvosmerna komunikacija sa uređajima na terenu. Problemi koje komunikaciona infrastruktura treba da reši nisu trivijalni i ima ih dosta – od bezbednosti, pouzdanosti, adresiranja i usmeravanja paketa do što niže cene održavanja, jednostavne proširivosti, a svakako i garantovanja određenog kvaliteta usluge. Tradicionalne računarske mreže su bazirane na internet protokolu (*engl. Internet Protocol, IP*) i koriste uglavnom statičku konfiguraciju, bez garantovanja kvaliteta usluge sa aspekta propusnog opsega i kašnjenja poruka.

1.3. Problem obrađen u disertaciji

Kako će veliki broj uređaja koji će biti u mreži generisati velike količine podataka, potrebno je obezbediti odgovarajući propusni opseg i maksimalno prihvatljivo kašnjenje. Za uspešnu

implementaciju pametne mreže neophodna je napredna komunikaciona infrastruktura [15]–[18]. Javna internet mreža će definitivno biti korišćena u ove svrhe prvenstveno zato što je razvoj potpuno nove komunikacione infrastrukture izuzetno skup. Pametne mreže će koristiti javnu internet mrežu makar za pojedine komunikacione potrebe [19] te će definitivno postojati mešanje saobraćaja koji nije pod direktnom kontrolom elektrodistributivnog preduzeća.

Posledice izostanka pravovremene reakcije na događaj u elektroenergetskoj mreži mogu biti ozbiljne – potencijalno preopterećenje ili čak i ispad elektroenergetskog sistema uz ugrožavanje ljudskih života [20]. Najčešći razlog ispada je upravo neuspešno pravovremeno reagovanje [15]. Nadziranje i kontrolu elektroenergetske mreže komplikuje složenost elektroenergetskog sistema – u Severnoj Americi je u njegovu stabilnost uključeno oko 3500 učesnika [10].

Obezbeđivanje odgovarajućeg kvaliteta komunikacione usluge može se rešiti na više načina: (1) instaliranjem maksimalnog propusnog opsega (*overprovisioning*), (2) optimizacijom na aplikativnom nivou i (3) obezbeđivanjem na infrastrukturnom nivou.

Hipoteza ove doktorske disertacije jeste da aktivno učešće pametne mreže u upravljanju komunikacionom infrastrukturom baziranoj na programabilnoj računarskoj mreži pruža bolje performanse u odnosu na tradicionalne IP mreže statički instaliranog kapaciteta. Analiza se vrši sa aspekta garancije propusnog opsega i kašnjenja poruka, u uslovima opterećenja komunikacione infrastrukture saobraćajem različitog, promenljivog prioriteta i propusnog opsega. Hipoteza će biti dokazana merenjem propusnog opsega i kašnjenja saobraćaja za AGC, VVO, SCADA i AMI OT aplikacije u različitim uslovima mrežnog opterećenja, uz merenje gubitka paketa i prozora zagušenja za AGC saobraćaj.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije predstavlja ispitivanje da li je moguće obezbediti kvalitet usluge komunikacione infrastrukture korišćenjem programski definisanih komunikacionih mreža (*engl. Software Defined Networks, SDN*) uzimajući u obzir promenljivost komunikacionih zahteva pametne mreže sa aspekta: (a) prioriteta saobraćaja, (b) potreba za dostupnim propusnim opsegom i (c) kašnjenja paketa. Polazi se od pretpostavke da će se makar delom za komunikacionu infrastrukturu koristiti javna internet mreža, a i da će propusni opseg trošiti i aplikacije koje ne pripadaju pametnim mrežama. Važno je naglasiti da je fokus na tome da komunikacionom infrastrukturom upravlja pametna elektroenergetska mreža na osnovu njenog stanja kako bi se dostigao globalni optimum za funkcionisanje tog kritičnog infrastrukturnog sistema.

Podskup rezultata ovog istraživanja objavljen je u časopisu *Future Generation Computer Systems* [21] kategorije M21A i konferenciji *26th Telecommunications Forum (TELFOR)* [22] kategorije M33. Rad [21] predstavlja formalni uslov za ovu disertaciju.

Cilj istraživanja predstavlja analiza i eksperimentalna potvrda da komunikaciona infrastruktura za pametne mreže, zasnovana na programski definisanim mrežama, može da odgovori zahtevima pametne mreže uzimajući u obzir njenu dinamičnost.

Očekuje se da će predloženo rešenje ispunjavati komunikacione zahteve navedene u [10]:

1. Pružati čvrstu garanciju QoS preko cele mreže dokle god kriterijumi uzeti u obzir prilikom dizajna sistema nisu narušeni;
2. Imati dugačak životni vek i biti predviđena za proširenje namene u budućnosti;
3. Pružati izuzetno nisko kašnjenje što predstavlja zahteve određenih OT aplikacija;
4. Omogućiti visoku propusnost.

Uz ove zahteve važno je i da podaci budu vremenski poravnati [10].

Rezultati disertacije su: (a) model komunikacione mreže za pametne mreže, (b) predlog rešenja za dinamičku prioritetizaciju na osnovu stanja u pametnoj mreži i (c) testno okruženje kojim je potvrđena upotrebljivost predloženog rešenja i koje omogućava razvoj i verifikaciju novih strategija rukovanja mrežnim saobraćajem zasnovanim na programski definisanim mrežama.

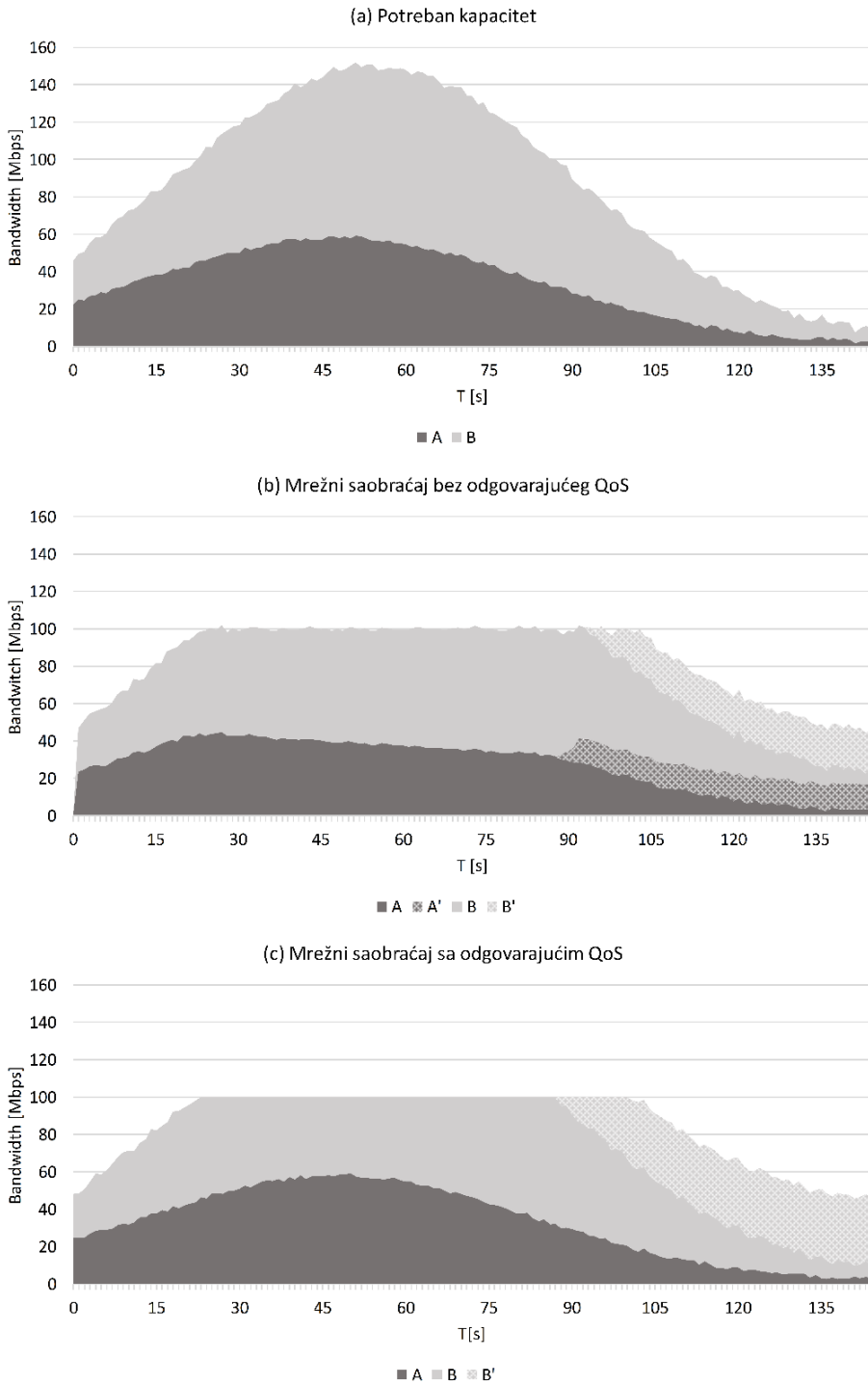
Disertacija se sastoji od osam poglavlja. U drugom poglavlju dat je pregled aktuelnog stanja iz oblasti istraživanja. Treće poglavlje daje pregled onoga što se podrazumeva pod pametnim mrežama, kakva je komunikaciona infrastruktura potrebna, kao i koji se komunikacioni protokoli koriste. Četvrto poglavlje pruža uvid u tehnologiju na kojoj je rešenje zasnovano – programski definisane mreže kao i njihova upotreba u elektroenergetici. Peto poglavlje opisuje dizajn rešenja i njegovu implementaciju. Da bi se izvršila verifikacija rešenja razvijena je evaluaciona platforma koja je opisana u poglavlju šest. Rezultati i njihova analiza navedeni su u poglavlju sedam, dok je zaključak sa budućim planovima naveden u poglavlju osam.

1.4. Postavka problema

Problem koji se rešava u ovom radu jeste QoS garancija unutar komunikacione infrastrukture pametnih mreža u uslovima mrežnog zagušenja, i to iz ugla garancije propusnog opsega i kašnjenja na osnovu informacija dobijenih od OT aplikacija. U tradicionalnim IP mrežama svi paketi se isto tretiraju i ne pravi se razlika između različitih

tokova podataka. Protokoli transportnog nivoa će se u zavisnosti od implementacije različito ponašati u slučaju kada dođe do zagušenja mreže. TCP protokol prati da li dolazi do zagušenja i u tim slučajevima smanjuje tempo slanja podataka kako bi se komunikacioni kanal rasteretio. Kad zagušenja nema, postepeno povećava tempo slanja dok ne dođe do zagušenja ili dok se podaci ne šalju tempom kojim ih šalje aplikativni sloj. Ovo ima za posledicu podelu propusnog opsega između svih TCP veza ali i drugog mrežnog saobraćaja. Protokol za prenos korisničkih datagrama (*engl. User Datagram Protocol, UDP*) ne prepoznaje koncept zagušenja mreže i podaci se šalju tempom kojim to radi aplikativni sloj. U slučaju da dođe do zagušenja, poruke se gube a zagušenje se ne ublažava. Do preopterećenja može doći iz različitih razloga, a obično se dešava: (a) kada aplikacije koje koriste mrežu generišu više podataka nego što je kapacitet mreže ili (b) kada usled kvara dolazi do smanjenja kapaciteta mreže.

Slika 1 (a) ilustruje primer potreba za propusnim opsegom od strane privilegovane aplikacije A i neprivilogovane aplikacije B koje koriste TCP. Može se videti da je vršno opterećenje mreže oko 150Mbps. Slika 1 (b) ilustruje šta će se desiti ukoliko je propusni opseg ograničen na 100Mbps. Oba toka podataka, A i B, neće moći da pošalju sve potrebne podatke u periodu kada je potreban propusni opseg manji od onog koji je na raspolaganju. Vidi se da su vrhovi redukovani onoliko koliko propusni opseg dozvoljava, što može varirati od primenjenog algoritma za izbegavanje zagušenja. Preostali podaci, A' i B' poslati su naknadno, sa zakašnjenjem, kada je propusni opseg oslobođen. Ovo nije prihvatljivo za kritične aplikacije kojima je važna pravovremena razmena podataka između OT aplikacija i uređaja na terenu. Ako se implementira takav QoS da se njime garantuje propusni opseg za saobraćaj A, samo će tok podataka B biti pod uticajem zagušenja, dokle god je instalirani kapacitet dovoljan za saobraćaj A. Slika 1 (c) ilustruje ovaj slučaj. Vidi se da kod toka podataka A nema odstupanja od mrežnog opterećenja koje ilustruje 1 (a). Podaci koji nisu poslati na vreme, B', biće i poslati kad se pojavi dostupan propusni opseg. Na ovaj način se propusni opseg može maksimalno koristiti dokle god je dovoljan za prioritetan saobraćaj.



Slika 1: Ilustracija propusnog opsega prilikom opterećenja sa QoS i bez njega

Iz ugla komunikacionog saobraćaja pametnih mreža, podrazumevaju se sledeći zahtevi:

- R1. Komunikacioni saobraćaj pametnih elektroenergetskih mreža (*engl. Smart Grid, SG*) se može podeliti u klase. U tradicionalnim sistemima se obično koristi sledeća podela podsistema pametnih mreža [9]: SCADA, AMI, OMS, električna vozila, video nadzor itd. Ove OT aplikacije imaju zahteve po pitanju komunikacione infrastrukture – propusni opseg i maksimalno kašnjenje paketa. U isto vreme, niz drugih aplikacija koje nisu direktno povezane sa upravljanjem pametnim mrežama takođe dele mrežne resurse. U ovoj disertaciji se koristi sledeća podela mrežnog saobraćaja:
- a. AGC
 - b. VVO
 - c. SCADA
 - d. PMU
 - e. AMI
 - f. Pozadinski saobraćaj.

Prvih pet tipova saobraćaja se odnosi na mrežni saobraćaj OT aplikacija, dok se poslednji, pozadinski saobraćaj, ne odnosi na komunikaciju sa uređajima na terenu. Primeri pozadinskog saobraćaja su replicirani podaci, grafički podaci, periodično arhiviranje podataka, podaci koji se šalju klijentskim aplikacijama, WEB saobraćaj i slično. Takođe, ovaj saobraćaj ne mora pripadati elektrodistributivnom preduzeću već drugim korisnicima mrežne infrastrukture. Ako se kao primer uzme internet, ovo može biti video saobraćaj.

- R2. Svaka klasa komunikacionog saobraćaja ima svoj nominalni prioritet koji se može dinamički menjati [1], [23]. Jedan primer dinamizma prioriteta je objašnjen u [1], kada se AMI saobraćaju, koji je inače nižeg prioriteta, treba dati povišen prioritet i kraća tolerancija kašnjenja u oblasti u kojoj se vrši upravljanje potrošnjom (*engl. Demand Response, DR*). Takođe, kod hitnih slučajeva ili nakon incidenta u mreži, voki-toki saobraćaj treba da ima viši prioritet. Još jedan primer kada je dinamička prioritizacija potrebna jeste prilikom puštanja u rad uređaja na terenu. Loše podešena udaljena telemetrijska jedinica (*engl. Remote Telemetry Unit, RTU*) koja šalje kompletnu istoriju promena kad god postoji problem sa vezom može izazvati značajan i bespotreban mrežni saobraćaj koji ugrožava druge aplikacije pametne mreže. Ovo se može rešiti tako što će se komunikacioni saobraćaj opreme za vreme testiranja tretirati nižim prioritetom. Kada je oprema spremna za korišćenje u produkcionom sistemu, može joj se dodeliti odgovarajući prioritet.

R3. Propusni opseg koji je potreban određenoj klasi mrežnog saobraćaja se može promeniti dinamički. Potreban propusni opseg zavisi od nekoliko parametara. Kao što je ranije navedeno, SCADA mrežni saobraćaj varira u toku dana. Slično, određene aplikacije pametne mreže se izvršavaju povremeno i rezultuju povećanom potrebom za mrežnim saobraćajem. Primer ovakve aplikacije je disagregacija potrošačkih profila uzorkovanjem merenja na pametnim brojlama, na zahtev, što će naknadno biti detaljnije objašnjeno.

2. Pregled literature

Problem garancije kvaliteta usluge u pametnim mrežama je nešto čime se naučna zajednica bavi već određeno vreme. Određeni aspekti ovog problema su adresirani različitim pristupima i različitim tehnologijama. Ovo poglavlje pruža pregled stanja u oblasti koja se obrađuje u disertaciji.

Rad [24] prikazuje decentralizovanu komunikacionu infrastrukturu koja bi se koristila za agregaciju podataka sa PMU uređaja. Predstavljen je metod za optimalno postavljanje mrežne opreme za usmeravanje kako bi se smanjila količina podataka koja se šalje. Aplikacije za pametne mreže od kojih se očekuje brza reakcija mogu biti instalirane blizu same opreme, a centralizovana baza distribuirana i smešten u srednji sloj. Srednji sloj ima ulogu da vrši slanje podataka zainteresovanim aplikacijama, u skladu sa potrebama. Korišćen je UDP protokol sa pretpostavkom da je šansa za gubljenje podataka na namenskoj mreži mala. U ovoj disertaciji se polazi od pretpostavke da će doći do preopterećenja mrežne infrastrukture, što je jedna od razlika između ova dva rada. Preopterećenje namenske mreže predstavlja realan scenario. Dodatno, predloženo rešenje neće omogućiti favorizovanje određenog toka podataka u slučaju zagušenja mreže a samim tim ni dinamičko prioritizovanje mrežnih paketa, dok je rešenje predstavljeno u ovoj disertaciji generičko i primenjivo za sve tipove saobraćaja u pametnim mrežama. Zatim predloženo rešenje ne objašnjava kako bi se kvalitet usluge obezbedio sa porastom zahteva za mrežnim kapacitetom kako elektroenergetska mreža bude rasla.

Rad [25] prikazuje upotrebu SDN tehnologije za smanjenje mrežnog saobraćaja koji generišu PMU uređaji. PMU uređaji obično generišu 120 paketa po sekundi (uzimanje odbiraka se vrši i frekvencijom od 120Hz). Aplikacije za pametne mreže koriste od 30 do 120 odbiraka u sekundi. Predložen je pristup da mrežna oprema propušta onoliko paketa po sekundi koliko je najviše potrebno bilo kojoj aplikaciji u tom delu mreže. Na taj način se smanjuje količina paketa koja se šalje kroz komunikacionu mrežu. Problemi koje ovaj pristup ne rešava slični su kao problemi navedeni za [24] i odnose se na slučajeve kada dođe do zagušenja komunikacione mreže. Nije predviđen mehanizam za (re)prioritizovanje mrežnog

saobraćaja. Takođe ostaje nerešen i problem porasta zahteva za mrežnim kapacitetom usled rasta elektroenergetske mreže.

Usmeravanje paketa na osnovu oznake protokola (*engl. Multiprotocol Label Switching, MPLS*) omogućava definisanje pravila za prosleđivanje paketa na osnovu njegovog sadržaja. Pri ulasku paketa u mrežu dodeljuje se labela. Umesto da se vrši pretraga tabela rutiranja, paketi se usmeravaju na osnovu labele, a zaglavlje IP protokola se analizira samo jednom, pri ulasku u mrežu. MPLS podržava određene metode inženjeringa saobraćaja (*Traffic engineering, TE*) koji se može iskoristiti za QoS. Jedna od mana koje MPLS ima je moguća značajna rekonfiguracija mreže i testiranje, što je vremenski kritična operacija [26]. Takođe, dodavanje novih servisa uključuje njihovo dodavanje u svakom mrežnom ruteru [26]. U pomenutom radu autori vrše poređenje MPLS i SDN bazirane komunikacione mreže za pametne elektroenergetske mreže i dolaze do zaključka da SDN rešenje zasnovano na OpenFlow (OF) protokolu može imati slične karakteristike kao MPLS oprema uz odgovarajuću konfiguraciju.

Autori u [18] su mrežni saobraćaj podelili u četiri kategorije. Iskoristili su MPLS TE za garanciju kvaliteta usluge i primetili da je kašnjenje znatno redukovano. Autori se nisu bavili problematikom dinamičkog reprioritetizovanja što je izuzetno važno, a obrađeno je u ovoj disertaciji. Autori su u [27] zaključili da OpenFlow može da zameni MPLS uz benefit centralizovanog rukovanja mrežom.

Mane koje MPLS ima u odnosu na SDN su sledeće [28]:

1. Slaba efikasnost jer servisi šalju podatke kroz mrežu kad odluče, ne uzimajući u obzir stanje u mreži;
2. Često se koristi lokalni optimum, a za globalni optimum je potrebno imati uvid u globalno stanje mreže.

Isti rad [28] navodi da se prilikom komunikacije između Majkrosoftovih računarskih centara prenese 60% više podataka kada se koristi SDN u odnosu na MPLS. Dodatna mana kad se koristi MPLS jeste to što ne postoji mehanizam za kombinovanje konfiguracije između različitih internet provajdera [10], odnosno autonomnih sistema.

Rad [29] predstavlja SDN upotrebu u pametnim mrežama u svrhu povećanja otpornosti mreže. Konkretno, SDN se koristi za brzo uspostavljanje mrežnih puteva u slučaju kada dođe do njihovog prekidanja. U slučaju otkaza mrežne opreme, razvijeni kontroler izvršava analizu mreže, pronalazi novu, najkraću putanju. Autori koriste SDN za podešavanje putanja sa jednog na drugi kraj mreže i u slučaju proširenja mreže. Za razliku od ove disertacije, rad

se bavi otpornošću mreže, a ne obezbeđivanjem kvaliteta usluge i dinamičkim prioritetizovanjem saobraćaja.

Rad [30] se bavi iskorišćavanjem obnovljivih resursa u mikromrežama korišćenjem algoritma za traženje najkraće putanje za deljenje električne energije. Komunikaciona infrastruktura se koristi za koordinaciju. Korišćena je troslojna komunikaciona infrastruktura, a decentralizacijom se smanjuje količina podataka koju je potrebno preneti kroz mrežu. Rad se ne bavi kvalitetom usluge kao ni prioritetizovanjem saobraćaja, što je obrađeno u ovoj disertaciji.

Rad [31] predstavlja SDN baziranu platformu za IoT u pametnim mrežama. Predloženo rešenje omogućava nadzor mreže u realnom vremenu kako bi se otkazi u mreži prevazišli uspostavljanjem dinamičke mrežne putanje. Cilj je i minimizovanje mrežnog saobraćaja. Kontroler na osnovu stanja komunikacione mreže i zadatog QoS određuje kuda će određeni tok podataka prolaziti. Nije dozvoljeno da više tokova podataka ide istom putanjom kako bi se izbeglo zagušenje, pa se može reći da se QoS obezbeđuje usmeravanjem paketa. Ova disertacija nudi mogućnost dinamičkog (re)prioritetizovanja saobraćaja kao i dinamičko menjanje QoS i kada se koristi samo jedna komunikaciona putanja za više tokova podataka.

Rad [32] predstavlja upotrebu SDN tehnologije za rukovanje IEC 61850 baziranim sistemima sa dosta širokim spektrom funkcionalnosti. SDN kontroler na osnovu topologije mreže određuje najkraću putanju paketa uz filtriranje, održavanje kvaliteta usluge i balansiranje opterećenja. Održavanje kvaliteta usluge je statičko, gde je u ovoj disertaciji adresiran dinamizam pametne mreže sa aspekta promenljivih prioriteta, potrebnog propusnog opsega i komunikacionog kašnjenja.

Rad [33] Autori su razvili testno okruženje SDN4SmartGrid sa četiri mrežna sviča, jednim kontrolerom i dva servera. Jedan server se koristi za generisanje podataka a drugi za primanje podataka. Rad implementira algoritam za brz oporavak i pružanje statičkog kvaliteta usluge garantovanjem unapred definisanog propusnog opsega po toku podataka. Ova disertacija se bavi dinamizmom pametne mreže sa aspekta promenljivih prioriteta, potrebnog propusnog opsega i komunikacionog kašnjenja. Dodatno, u ovoj disertaciji, komunikacionom mrežom upravlja upravo pametna mreža.

Rad [34] se fokusira na upotrebu SDN tehnologije u svrhu povećanja otpornosti. Predloženo rešenje u slučaju otkaza jednog od mrežnih interfejsa koristi drugi, redundantni mrežni interfejs. Rešenje je verifikovano u Mininet okruženju. Rad se ne bavi problemom kvaliteta mrežne usluge, što je u ovoj disertaciji ključno.

Autori u [35] su iskoristili SDN kako bi povećali bezbednosnu otpornost. U slučaju preopterećenja mreže oni odbacuju tokove podataka koji nisu od interesa ili ih smeštaju na red nižeg prioriteta ukoliko nisu kritični. Kritične podatke smeštaju na poseban, namenski red. Autori ne pokrivaju zahteve različitih aplikacija pametne mreže niti dinamičnost prioriteta saobraćaja karakterističnog za pametne mreže.

Rad [36] koristi SDN kako bi se povećala otpornost mreže. Autori pokrivaju veliki broj zahteva za kvalitet usluge. U radu je predstavljeno rešenje koje meri kašnjenje u mreži kroz posebno definisan protokol. Ukoliko kašnjenje za određeni tok podataka prevaziđe definisano vreme, paketi za taj tok se preusmeravaju na alternativnu putanju sa odgovarajućim kraćim kašnjenjem. Takođe, autori nude pružanje kvaliteta usluge baziranog na tabeli merenja (*meter table*) – paketi koji pripadaju manje važnom toku podataka se odbacuju kada ugrožavaju prioritetni saobraćaj. [36] u odnosu na disertaciju ne obrađuje dinamičko prioritetizovanje u testovima a rešenje je verifikovano na nivou jednog mikrogrida dok se u disertaciji vrši verifikacija rešenja simulacijom komunikacionog saobraćaja na nivou nekoliko gradova.

U radu [37] autori su iskoristili SDN za koordinaciju kako bi napravili ekonomično, efikasno i proširivo rešenje za pametna vozila. Fokus predstavljaju koordinacija i upravljanje, dok je u disertaciji fokus na pružanju odgovarajućeg kvaliteta usluge.

SDN bazirana komunikaciona infrastruktura može imati višestruke benefite u pametnim mrežama [26], [38]: pruža globalni pregled i kontrolu mreže što nije tipično za tradicionalne mreže, programski definisana konfiguracija mreže i obezbeđivanje propusnog opsega na zahtev. SDN se može koristiti za unapređenje otpornosti komunikacione mreže [39]. Isti rad navodi da su IP bazirane mreže uglavnom statički konfigurisane. Ako uzmemo, na primer, rutiranje, naknadna promena može biti kompleksna, ako je uopšte i moguća. Benefiti SDN upotrebe u pametnim mrežama su jednostavnije i efikasnije upravljanje mrežom kao i jednostavnije dodavanje novih funkcionalnosti kroz programabilnost kontrolera, kao što je ilustrovano u [17].

Postoje inicijative za istraživanje različitih aspekata korišćenja SDN tehnologije. Na primer, uspešno skaliranje na stotine učesnika i pravila za upravljanje mrežom pokriveno je projektom *SDN Exchange* prototip [40].

3. Pametne mreže

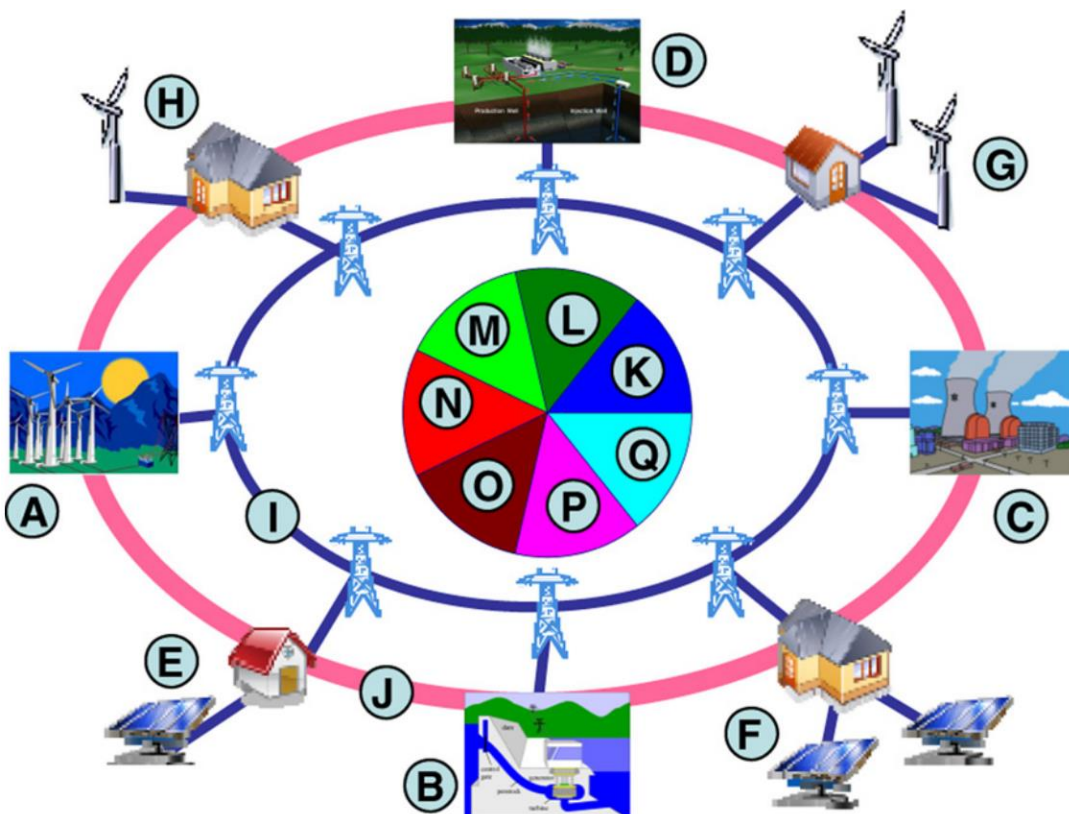
Elektroenergetski sistem je sistem u okviru kog se izvode sve elektroenergetske transformacije: proizvodnja, prenos, distribucija i trošenje (pretvaranje u upotrebne oblike) električne energije [41]. Osobine koje elektroenergetski sistem (EES) ima su: (1) pouzdanost, (2) sigurnost i (3) ekonomičnost [41]. Pouzdanost sistema predstavlja verovatnoću da će biti napajan električnom energijom [41]. Sigurnost predstavlja sposobnost sistema da prevaziđe i nastavi rad nakon otkaza jedne ili više komponenti [41]. Ekonomičnost sistema podrazumeva *ekonomičnu izradu* sistema (minimalna ulaganja koja će omogućiti zadovoljavanje planiranih kriterijuma pouzdanosti i sigurnosti) i *ekonomičan pogon* kojim se potrošači zadovoljavaju na najekonomičniji način [41]. EES se može podeliti na četiri segmenta, a to su: (a) proizvodnja, (b) prenos, (c) distribucija i (d) potrošnja elektroenergetske energije. Tradicionalne elektroenergetske mreže podrazumevaju centralizovanu proizvodnju i upravljanje elektroenergetskom mrežom, kao i upravljanje uređajima do nivoa srednjeg napona.

Da bi pametne mreže mogle da zamene tradicionalne elektroenergetske mreže, treba da budu efikasnije, bezbednije i pouzdanije od njih. Predviđeno je da većina uređaja koja je spojena na mrežu aktivno učestvuje u radu mreže, odnosno podrazumeva se dvosmerna komunikacija između uređaja u mreži (uključujući i krajnje potrošače) i kontrolnih centara. Kontrolni centri će izvršavati različite aplikacije na osnovu informacija koje dobiju sa terena. Da bi se omogućio potpuni potencijal pametnih mreža biće neophodno omogućiti i pojedinačno adresiranje uređaja unutar mreže. Benefiti koji se očekuju od pametnih mreža su detaljno izloženi u radu [42]:

- Unapređenje pouzdanosti i kvaliteta električne energije
- Optimizacija iskorišćenosti sistema i izbegavanje pravljenja dodatnih elektrana koje bi se koristile samo prilikom dostizanja vršne potrošnje
- Unapređenje kapaciteta i efikasnosti postojećih elektroenergetskih mreža
- Unapređenje otpornosti na poremećaje u sistemu
- Omogućavanje prediktivnog održavanja i „samoizlečivih“ odgovora na remećenje rada sistema

- Fasilitacija proširenog dodavanja obnovljivih energetske izvora
- Pojednostavljenje distribuiranih izvora električne energije
- Prilagođavanje distribuiranim izvorima energije
- Automatizacija održavanja i rukovanja mrežom
- Smanjenje emisije gasova staklene bašte omogućujući rad električnih vozila i novih izvora električne energije
- Smanjenje potrošnje nafte smanjujući neefikasnu proizvodnju struje prilikom vršne potrošnje
- Ukazivanje na mogućnosti unapređenja bezbednosti mreže
- Omogućavanje tranzicije na električna vozila i nove mogućnosti skladištenja električne energije
- Povećavanje izbora koje potrošači imaju.

Slika 2 prikazuje arhitekturu pametne elektroenergetske mreže i podsisteme koje ona obuhvata: *A* predstavljaju obnovljivi izvori električne energije, *B* i *C* su konvencionalni izvori električne energije – hidroelektrane i termoelektrane, *D* je elektrana na geotermalne izvore, *E*, *F*, *G* i *H* su mikromreže, *I* je infrastruktura za prenos električne energije, *J* je komunikaciona infrastruktura, a od *K* do *Q* je sedam ključnih domena: proizvodnja, prenos, distribucija, upravljanje, trgovina, potrošači i pružanje usluga, respektabilno [8].



Slika 2: Arhitektura pametne mreže[8]

3.1. Aplikacije operativnih tehnologija za pametne mreže

Da bi pametne mreže mogle da ispune prethodno navedene ciljeve, potrebno je da podrže širok spektar aplikacija. Svrha ovih aplikacija jeste da omoguće pouzdanije, sigurnije i efikasnije upravljanje mrežom. OT aplikacije ne moraju da funkcionišu nezavisno, nad disjunktivnim skupovima podataka, već se često međusobno integrišu i dele podatke. OT aplikacije su uglavnom aplikacije za rad u realnom vremenu, čija definicija sledi: „Aplikacija u realnom vremenu mora davati odgovor koji je u određenim vremenskim granicama.“ [43]

Kod aplikacija u realnom vremenu se podrazumeva da je obradu podataka i reagovanje neophodno uraditi unutar određenog vremenskog intervala koji se definiše za proces kojim aplikacija upravlja. U ovom slučaju se radi o elektroenergetskom sistemu.

Tipične aplikacije za pametne mreže su sledeće:

3.1.1. Akviziono upravljački sistem

Temelj pametne mreže predstavlja svakako SCADA sistem. SCADA ima sledeće funkcionalnosti:

1. Prikupljanje podataka sa terena kroz različite komunikacione protokole;
2. Slanje komandi uređajima na terenu;
3. Obeležavanje uređaja, alarmiranje u zavisnosti od situacije na terenu;
4. Čuvanje i prikazivanje na zahtev redosleda događaja i vrednosti merenja sa terena – trend;
5. Formiranje upravljačke logike koja će se izvršiti na osnovu stanja određenog uređaja (na primer: u slučaju otvaranja prekidača P1 – zatvoriti prekidač P2 ili u slučaju da napon na merenju M1 pređe određenu granicu, otvoriti prekidač P3 itd).

SCADA pristupa uređajima na terenu preko udaljene telemetrijske jedinice (*Remote Telemetry Unit, RTU*). Komunikacija sa RTU se vrši obično preko nekog od industrijskih protokola kao što su DNP3, IEC101, IEC104, IEC 61850, Series5, Modbus itd.

SCADA sistem obično koriste druge OT aplikacije kao što su sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom (engl. *Distribution Management System, DMS*) i EMS kako bi imale stanje uređaja na terenu i mogle da vrše interakciju sa uređajima na polju – konkretno izvršavanje komandi.

3.1.2. Regulacija učestalosti i aktivnih snaga

Frekvencija je indikator odnosa između proizvodnje i potrošnje u elektroenergetskom sistemu. Ona će rasti ukoliko potrošnja bude manja od proizvodnje ili padati u obrnutom slučaju. Do ovoga može doći, na primer, u slučaju isključenja potrošača sa mreže ili ispada generatora. Ukoliko sistem može sam da amortizuje ovu promenu, to se zove samoregulacija sistema po frekvenciji. Ukoliko to nije moguće, komande se šalju generatorima da se proizvodnja poveća ili smanji kako bi se frekvencija vratila u normalne vrednosti. Ovo je važno kako da bi sistem radio na adekvatnom nivou sigurnosti [44]. Automatizovanje ovog procesa se zove regulacija učestanosti i aktivnih snaga ili skraćeno AGC, i može se izvršavati nad jednom (izolovanom) regulacionom oblasti ili nad više povezanih oblasti [44]. Kada se AGC izvršava nad više povezanih regulacionih oblasti, neophodno ih je istovremeno izvršavati [44].

3.1.3. PMU koncentrador podataka

PMU uređaji mere amplitudu i fazni pomeraj struje i napona sa frekvencijom od 30 do 120Hz [45]. Svakom merenju pridružuju vreme i takvi podaci se šalju koncentratoru podataka

(*PMU data concentrator*). Koncentrator podataka ove informacije pruža drugim dostupnim OT aplikacijama. Zbog velike frekvencije uzorkovanja omogućuju analizu koja nije moguća sa tradicionalnim SCADA sistemima, čije je vreme uzorkovanja uglavnom reda veličine sekunde i PMU uređaji se smatraju jednim od najvažnijih uređaja za monitoring elektroenergetskih sistema [46]. Ugrađuju se u prenosni i distributivni deo elektroenergetske mreže.

Veliki severnoamerički ispad 2003. godine mogao je biti izbegnut da je bilo moguće uočiti rast fazne razlike između generatora [47]. Ispad je obuhvatio jugoistočnu Kanadu i osam severoistočnih država SAD-a[47]. Prouzrokovao je štetu od 6 milijardi dolara, ostavio 50 miliona ljudi bez struje na dva dana i izazvao najmanje 11 smrti [47]. Informacije koje PMU uređaji šalju mogu koristiti druge OT aplikacije. Zbog visoke frekvencije uzorkovanja PMU uređaji generišu relativno veliki (sprem SCADA sistema) i konstantan tok podataka, koji je kritično isporučiti OT aplikacijama koje ih koriste.

3.1.4. Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom

DMS predstavlja centralni sistem za upravljanje pametnom mrežom. Na osnovu podataka sa terena koje DMS dobija preko SCADA sistema izvršavaju se različiti proračuni. U zavisnosti od tipa proračuna, neki će prikazati stanje mreže operatoru, kao što su: proračun tokova snaga, topološka analiza i estimacija stanja. Rezultat drugih će biti upravljanje uređajima na polju, kao što to čini VVO. DMS se može integrisati sa drugim sistemima kao što su geoinformacioni sistem i AMI. Kako će se u ovoj disertaciji vršiti simulacija VVO proračuna, sledi detaljnije objašnjenje šta VVO predstavlja.

3.1.4.1. Volt/VAR optimizacija

Volt/VAR optimizacija je aplikacija za smanjivanje gubitaka i povećavanje efikasnosti mreže [48]. Radi se o jednoj od ključnih aplikacija koje se koriste za kontrolu u rukovanju elektrodistributivnom mrežom. Suština aplikacije je da se na nivou transformatorske oblasti vrši korekcija naponskih nivoa tako da budu što bliže nominalnoj vrednosti i uvek u propisanim granicama kako bi se smanjili gubici. Korekcije naponskih nivoa podrazumevaju slanje komandi regulacionim transformatorima i kondenzatorskim baterijama.

3.1.5. Upravljanje potrošnjom

Većina korisnika električne energije smatra njenu cenu konstantnom, iako u praksi cena proizvodnje varira [49]. DR predstavlja korekciju potrošnje električne energije motivišući korisnike da u trenucima vršne potrošnje isključuju određene potrošače (npr. bojler, klima-uređaj, mašinu za sušenje veša itd). Korisnici najčešće daju saglasnost elektrodistributivnom

preduzeću za namerno isključenje uređaja, u zamenu za nižu cenu električne energije. Jedan od benefita koji DR ima jeste izbegavanje ispada tako što se izbegava preopterećenje elektroenergetske mreže.

3.1.6. Infrastruktura za pametna brojila

AMI omogućava iskorišćavanje pametnih brojila potrošača i pristupanje uređajima unutar domaćinstva. Pametna brojila karakteriše dvosmerna komunikacija sa kontrolnim centrom, koja se koristi za očitavanje potrošnje električne energije u različitim vremenskim intervalima, kontrolom nad potrošačima u domaćinstvu, komunikacija sa uređajima unutar domaćinstva itd. Očitavanje može biti na mesečnom nivou u svrhu naplate potrošene energije ali i češće, u zavisnosti od potreba i mogućnosti pametnog brojila. Povećanje frekvencije očitavanja potrošnje pomoću pametnog brojila se može koristiti za neinvazivni monitoring. Primene neinvazivnog monitoringa potrošnje električne energije uređaja [50] su: sticanje boljeg razumevanja ponašanja potrošača kako bi se mogla postići preciznija prognoza potrošnje, praćenje potrošnje električne energije po pojedinačnim uređajima, aktivnije učestvovanje korisnika u donošenju odluke i verifikacije izvršenja DR[51]. Disagregacija može biti korisna u tranzitnom periodu dok još uvek ne mogu svi uređaji da pruže informaciju po dizajnu. Takođe se mogu koristiti za prismostru pojedinačnih domaćinstava od strane organa za primenu zakona. Značaj disagregacije je temeljno pokriven u [51] gde se navodi da je optimalan pristup za prikupljanje disagregacionih informacija kroz AMI.

3.1.7. Sistem za upravljanje otkazima

Sistem za upravljanje ispadima omogućava upravljanje planiranim i neplaniranim ispadima. Planirani ispadi su posledica održavanja mreže kada elektrodistributivno preduzeće planski pravi ispad. Neplanirani ispad predstavlja kvar usled kog je došlo do problema sa isporukom električne energije. OMS ima za cilj da omogući smanjenje vremena trajanja ispada i da olakša njegovu popravku. Može uključiti funkcionalnost lociranja, izolacije kvara i restauraciju napajanja (*engl. Fault Location, Isolation and Supply Restoration, FLISR*) koja, na osnovu informacija o mreži, vrši lociranje gde se desio ispad, izolaciju minimalnog dela mreže koji je pod uticajem ispada i ponovno snabdevanje električnom energijom dela mreže onda kada je to moguće.

3.2. Komunikaciona infrastruktura za pametne mreže

Da bi se očekivanja od pametnih mreža ispunila, obezbeđivanje odgovarajuće komunikacione infrastrukture je od kritičnog značaja. Moraju se zadovoljiti sledeći kriterijumi[52]:

1. Bezbednost. Kako se radi o kritičnom infrastrukturnom sistemu, bezbedan prenos informacija je od izuzetne važnosti, posebno za naplatu i kontrolu.
2. Sistemska pouzdanost, robusnost i dostupnost. Neophodno je omogućiti tok kritičnih informacija kako u normalnim uslovima tako i u uslovima ekstremnog preopterećenja ili oštećenja sistema. Do preopterećenja može doći usled kvara na opremi, kvara u samoj komunikacionoj infrastrukturi, informacionom sistemu itd.
3. Proširivost. Mreža će se širiti – usled rasta populacije, dodavanja novih uređaja, razvijanja novih aplikacija itd. Samim tim, komunikaciona mreža mora jednostavno biti proširiva, kako sa aspekta dodavanja novih čvorova tako i sa aspekta omogućavanja dodavanja novih izvora podataka ili aplikacija.
4. Osiguravanje kvaliteta usluge. U zavisnosti od tipa podataka koji se transportuje kroz mrežu (SCADA, AMI, itd), odnosno aplikacije koja će ih koristiti, variraju i zahtevi kako bi te informacije bile od koristi [9]. Takođe, za pojedine OT aplikacije je od posebne vrednosti ako su podaci vremenski poravnati [53].

Veliki broj autora se bavio sistematizacijom komunikacione arhitekture za pametne mreže: [8], [9], [15], [54]–[60]. Na osnovu tih radova, komunikaciona mreža se može podeliti na sledeće segmente:

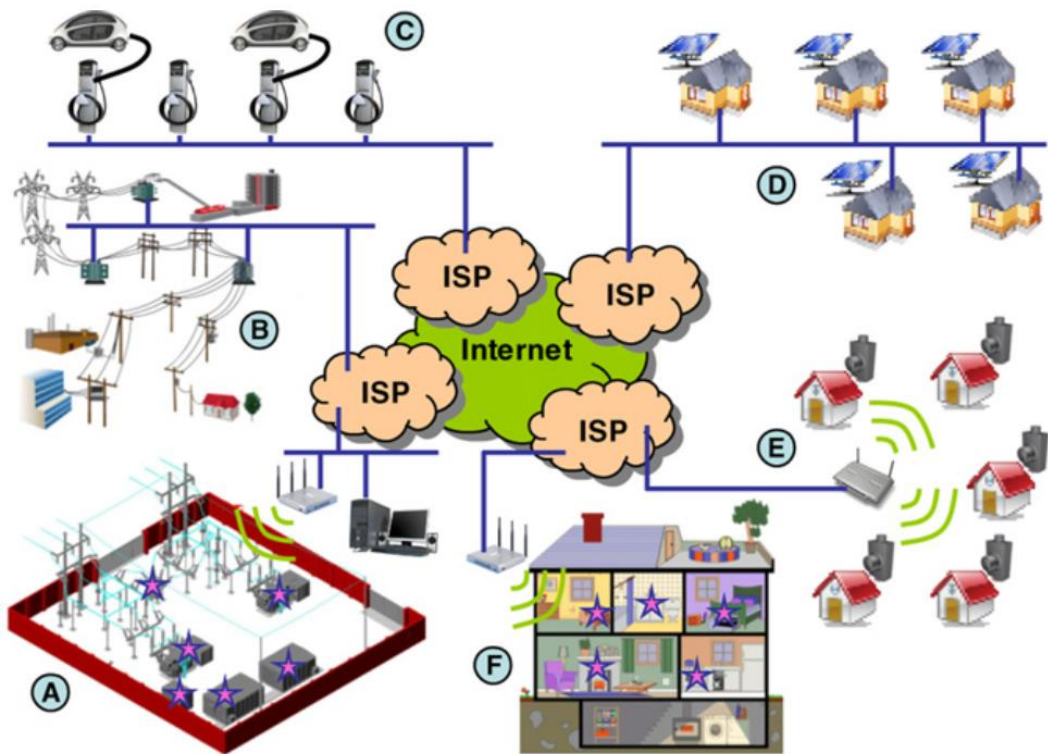
1. Kućna mreža (*engl. Home area network, HAN*). Uređaji u domovima korisnika će biti povezani na pametnu mrežu, počevši od pametnih brojila, električnih vozila i generatora do kućnih aparata.
2. Mreža u komšiluku, (*engl. Neighbourhood area network, NAN*). Predstavlja mrežu koja vrši agregaciju podataka iz jedne ili nekoliko ulica. Tipične tehnologije koje se koriste u ovom slučaju su kablovski prenos podataka (ADSL, kablovski) ili neka od radio- veza (RF, WiFi, mobilna mreža itd).
3. Prihvatna mreža, (*engl. Backhaul network, BN*). Povezuje mrežu elektroenergetskog preduzeća sa mrežama na terenu koje vrše akviziciju podataka i propagiranje komandi do samih uređaja.
4. Mreža elektroenergetskog preduzeća, (*engl. Core network, CN*) preko koje OT aplikacije imaju pristup uređajima mreže kao i eksternim servisima.

Tabela 1 prikazuje tehnologije koje se koriste po navedenim segmentima mreže. Tehnologije za HAN, NAN i BN navedene su na osnovu [57], [61]. CN tehnologije su navedene na osnovu iskustava autora.

Tabela 1: Korišćene tehnologije po segmentima mreže

Segment mreže	Primenjive tehnologije
HAN	Home Plug, ZigBee, WiFi, Z-Wave, Bluetooth
NAN	PLC, DSL, Koakcijalni kablovi, RF mreža, 4G, GPRS, WiMAX, ISM
BN	Mobilni internet, WiMAX, Optička mreža
CN	Optička mreža, Ethernet

Komunikaciona infrastruktura za pametne mreže će se sastojati od velikog broja heterogenih mreža što ilustruje slika 3, na kojoj A predstavlja podstanicu, B je deo elektroenergetskih vodova, C stanica za punjenje električnih vozila, D stambeni blok sa instaliranim solarnim kolektorima, E stambeni kompleks sa ugrađenim pametnim brojilima i F energetska pametna kuća sa električnim uređajima spojenim na pametnu mrežu [8].



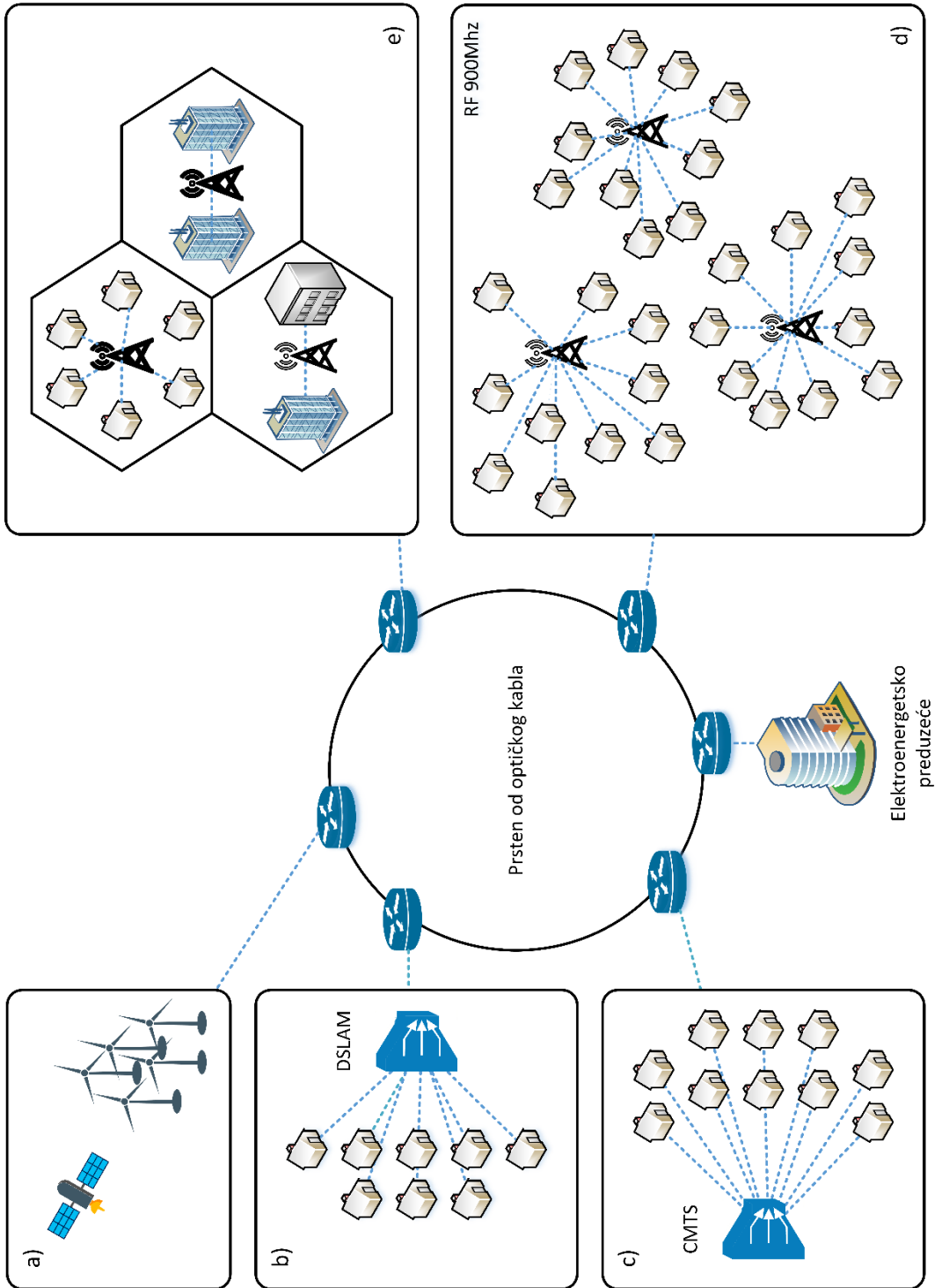
Slika 3: Primer komunikacione arhitekture pametne mreže [8]

Mreža internet provajdera je tu da poveže distribuirane delove mreže [8]. Očekuje se da će ispunjavati sledeće zahteve [42]:

- Kontrolabilnost
- Praćenje mrežnih aktivnosti
- Oporavak od problema
- Jednoznačno identifikovanje uređaja u mreži
- Usmeravanje paketa do svih delova mreže
- Kvalitet usluge za širok spektar aplikacija sa različitim mrežnim zahtevima (propusni opseg i kašnjenje paketa).

Slika 4 prikazuje primer kako se različite tehnologije koriste za komunikaciju u pametnim mrežama. Svaki deo mreže se povezuje na WAN. WAN ima topologiju prstena i koristi optičke kablove za komunikaciju između čvorova. Komunikacija sa uređajima u delu (a) se vrši preko satelitske veze. Deo mreže (b) koristi ADSL za pristupanje uređajima pametne

mreže. Podaci sa ADSL modema preko uređaja za pristup digitalnoj pristupnoj liniji (engl. *Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM*) dolaze u IP mrežu internet provajdera, odakle se usmeravaju u WAN. Uređaji u delu (c) pristupaju WAN-u preko kablovskog interneta dok uređaji u delu (d) pristupaju preko bežične mreže frekvencije od 900 MHz. Deo (e) koristi mobilnu mrežu.



Slika 4: Primer komunikacionih tehnologija u pametnim mrežama

3.3. Komunikacioni protokoli u pametnim mrežama

Pametne mreže će se oslanjati na veliki broj komunikacionih protokola u zavisnosti od uređaja kojima se pristupa. Neki od protokola su: DNP3 [62], IEC 61850, ICCP, IEC103, IEC104, C37.118.1/2 [63], [64]. Trenutno standardni protokoli, kao što su npr. DNP3 i IEC103, nisu potpuno rasprostranjeni jer je životni vek opreme elektroenergetskih sistema dugačak, nekad i preko 40 godina. Ovo dovodi do velikog broja starih (*legacy*) protokola koji će morati biti podržani (npr. Modbus i Series5).

IP predstavlja jedan od fundamentalnih protokola u internet i sličnim mrežama koji je osmišljen 1977. godine [65]. Nalazi se na trećem nivou ISO OSI referentnog modela i odgovoran je za:

- Adresiranje čvorova mreže kako bi se svakom čvoru unutar IP mreže moglo jedinstveno pristupiti;
- Usmeravanje datagrama kroz mrežu.

IP protokol se oslanja na protokole nivoa veze (drugi nivo protokola OSI referentnog modela) koji mogu prenositi poruke različite veličine. Zbog toga je neophodno IP paket podeliti na manje datagrame koji se nazivaju fragmenti [66]. Na odredišnoj strani se od fragmenata formiraju originalno poslati datagrami. Izuzetno dobro se pokazao u spajanju heterogenih mreža, skaliranju tokom rasta mreže i integraciji više sistema. Fokus ovog rada će se odnositi na IP bazirane mreže iz dva razloga:

1. Elektrodistribucije se već sada značajno oslanjaju na internet protokol [39].
2. Očekuje se da će biti još dominantniji [42].

IP ne garantuje redosled isporuke datagrama kao ni da li će datagram biti uopšte isporučen. Takođe ne garantuje ni redosled isporuke paketa. Vreme za isporuku poruka zavisi od opterećenja mreže zbog multipleksiranja paketa na mrežnoj opremi.

Industrijski protokoli za pametne mreže se mogu oslanjati na IP direktno ili indirektno. Direktno oslanjanje na IP podrazumeva da industrijski protokol sam priprema IP pakete, dok se kod indirektnog korišćenja podrazumeva korišćenje nekog od protokola transportnog sloja, kao što su TCP ili UDP. TCP predstavlja jedan od dominantnih protokola na internetu, a kako se tehnologije sa interneta primenjuju u elektroenergetskim sistemima, TCP se zbog svojih osobina koristi u kontrolnim sistemima, pa i pametnim mrežama jer rešava probleme: a) nepouzdanog prenosa podataka, (b) uspostave veze, (c) kontrole toka i (d) kontrole zagušenja.

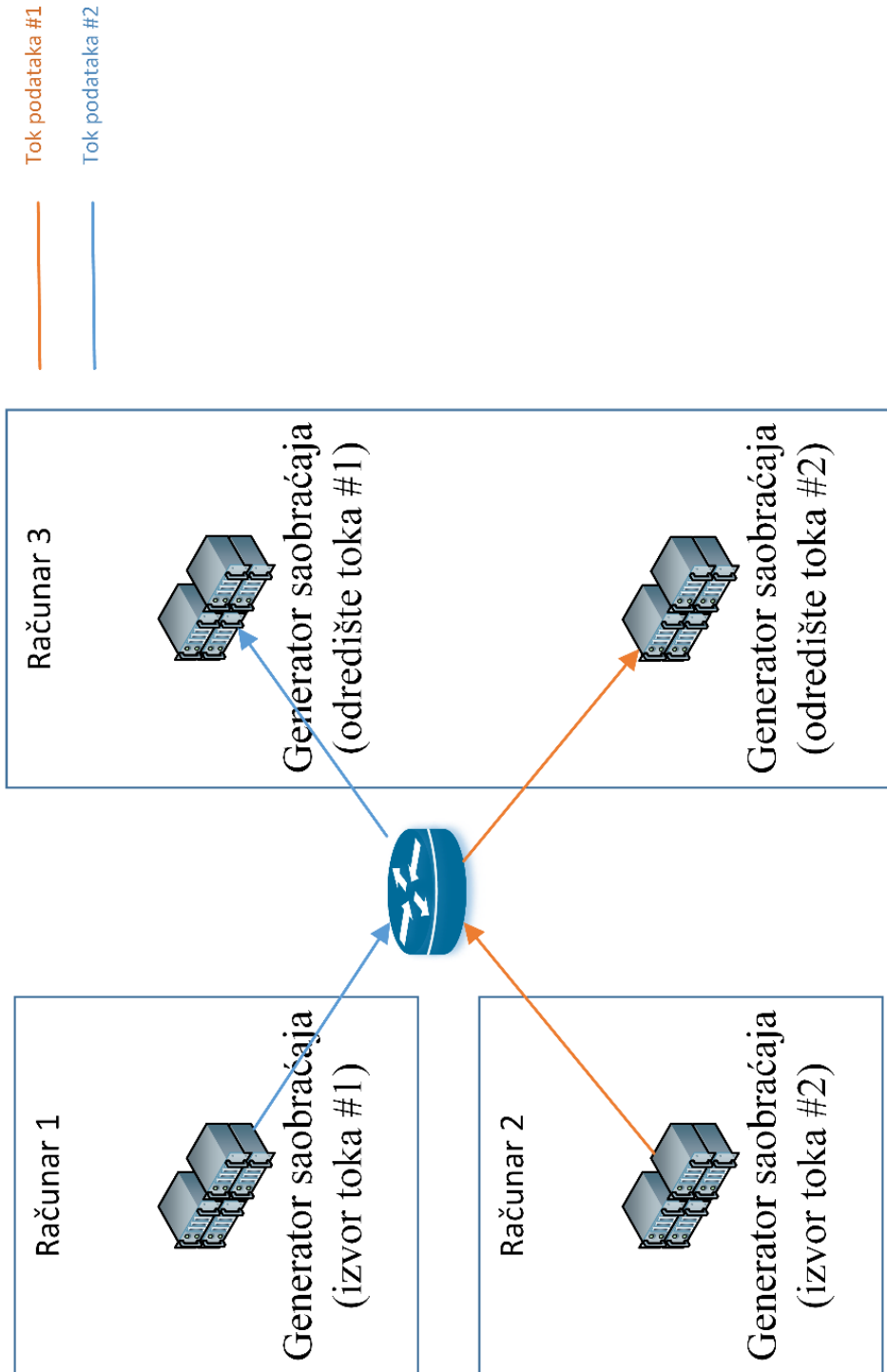
TCP je definisan 1981. godine, prvenstveno na osnovu zahteva za vojnu međuračunarsku komunikaciju po pitanju pouzdanosti prenosa podataka i standardizovane komunikacije između različitih aplikacija [67]. Pre bilo kakve razmene podataka vrši uspostavu veze kako bi utvrdio da postoji aplikacija na udaljenom čvoru kojoj su namenjeni podaci, što nije slučaj sa UDP. TCP iz ugla korisnika radi sa tokom podataka, dok interno razmenjuje segmente koji se sastoje od TCP zaglavljaja i klijentskih podataka. TCP vodi računa da segmenti poslani sa izvorne aplikacije stižu pouzdano do odredišne aplikacije. Ukoliko se poruke izgube na nižim nivoima, stignu više puta ili pogrešnim redosledom, korisnik toga neće biti svestan. Drajver protokola na odredištu šalje pakete potvrde o primljenim segmentima (ACK paketi) kako bi izvorna strana znala koje su poruke uspešno poslate. Uz svaku ACK poruku se šalje i koliko se bajtova može maksimalno primiti pre nego što pošiljalac bude očekivao potvrdu poslatih bajtova. Na taj način vrši kontrolu toka podataka (*flow control*). U literaturi se ovaj interval zove prozor primaoca (*receiver window, rwnd*). Izvorna strana vodi evidenciju o tome koji su segmenti uspešno isporučeni preko primljenih ACK poruka. TCP podržava istovremenu komunikaciju između oba čvora u oba smera (*full-duplex*).

TCP vodi računa i o zagušenju mreže. Naime, brzinu slanja segmenata kroz mrežu prilagođava uslovima u mreži – kada se prepozna zagušenje, slanje segmenata će se usporiti, dok će se ubrzati u slučaju kada nema zagušenja. Ograničavanje brzine slanja se vrši preko drugog intervala koji se zove prozor zagušenja (*congestion window, cwnd*). Postoje različiti algoritmi koji implementiraju logiku za određivanje veličine prozora zagušenja kao što su: *bic, cubic, vegas, westwood, veno, hybla* itd. Linux Ubuntu 14 koristi podrazumevani algoritam *cubic*. *Cubic* se razlikuje od prethodnog standardnog algoritma jedino u tome što umesto linearne koristi kubnu funkciju za unapređenje skalabilnosti i stabilnosti [68]. Kontrola zagušenja se sastoji od sledećih faza: (1) sporo pokretanje (*slow start*), (2) izbegavanje zagušenja, (3) brzo ponovno slanje i brzi oporavak [69]. Sporo pokretanje se vrši odmah nakon uspostave veze ili tokom oporavka od zagušenja. Tada se ispituje stanje mreže i izbegava slanje velike količine paketa. Na svaku potvrdu o prijemu, prozor zagušenja se postepeno povećava. Ovo se dešava dok *cwnd* ne dostigne predefinisanu vrednost (*ssthresh*) nakon čega se ulazi u fazu izbegavanja zagušenja. Pošiljalac može prepoznati da je došlo do gubitka podataka tako što je isteklo vreme za potvrdu prijema. Kada odredišna strana primeti da je došlo do primanja segmenta van očekivanog redosleda (*out of order delivery*), šalje dupli ACK paket kako bi pošiljalac znao da postoje određeni mrežni problemi. Algoritam za brzo ponovno slanje šalje nedostajući segment za koji je primljeno tri para ACK poruka, i tako dok ne prestanu da stižu duple ACK poruke.

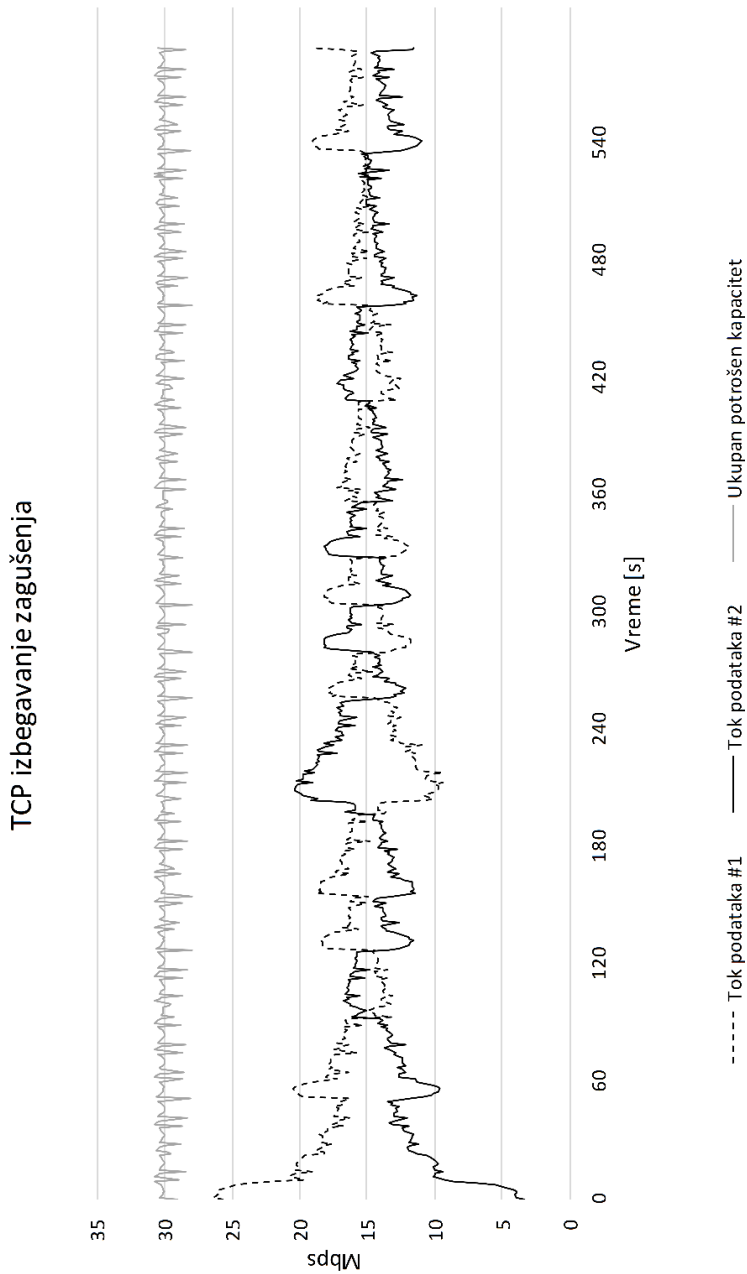
Kada je *cwnd* vrednost dostigla *ssthresh* vrednost, ulazi se u fazu izbegavanja zagušenja gde se pokušava povećanje iskorišćenja mreže bržim zauzećem propusnog opsega, dok se ne primeti zagušenje. U tom slučaju se brzina kojom se segmenti šalju smanjuje.

U cilju ilustracije na koji način funkcioniše kontrola toka napravljena je testna topologija koju prikazuje slika 5. Topologija se sastoji od tri fizičke mašine koje su povezane preko jednog programskog sviča Open vSwitch. Propusnost sviča je 30Mbps. Na svakoj fizičkoj mašini je pokrenut Linux operativni sistem Ubuntu 14.04. Generatori su pokrenuti kao što je ilustrovano na slici. Za generisanje saobraćaja je korišćena aplikacija *iperf* tako da šalje što više podataka.

Slika 6 ilustruje potrošnju propusnog opsega dva uporedna toka podataka sa sviča. Fluktuacije u mrežnom saobraćaju su posledica aktiviranja kontrole zagušenja. Vidi se da je sumarni propusni opseg blizu 30Mbps.



Slika 5: Mrežna topologija za ilustraciju kontrole zagušenja



Slika 6: Ilustracija uticaja kontrole zagušenja na propusni opseg

3.4. Kvalitet usluge

Pod obezbeđivanjem kvaliteta mrežne usluge podrazumeva se garancija propusnog opsega, kašnjenja i kvaliteta isporuke za određeni tok podataka. Postoji nekoliko pristupa na koji način je moguće obezbediti odgovarajući kvalitet usluge.

Prvi pristup je instaliranje maksimalnog propusnog opsega (*overprovisioning*). U ovom slučaju se prilikom projektovanja komunikacionog infrastrukturnog sistema izračunava maksimalan potreban propusni opseg u koji bi svakako bio uračunat i planirani rast u budućnosti, kako bi se izbeglo zagušenje i obezbedio garantovan traženi propusni opseg i kašnjenje u svakom trenutku. Manu ovog pristupa predstavlja velika investicija za infrastrukturu koja neće biti potpuno iskorišćena, a plaćena je na samom početku eksploatacije. Podaci koje prezentuje Centar za primenjenu analizu internet podataka (*engl. Center for Applied Internet Data Analysis, CAIDA*) [70] za pasivni mrežni monitor A u Čikagu pokazuju da je razlika između minimalnog i maksimalnog propusnog opsega 78%. Google [71] navodi da je za odgovarajući nivo usluge infrastruktura dizajnirana tako da prosečno bude iskorišćeno 30% – 40%. U praksi je potvrđeno da slična zakonitost postoji i u SCADA sistemima. Na osnovu navedenog, može se reći da će ovo ponašanje biti slično i u komunikacionoj infrastrukturi za pametne mreže. Druga mana ovog pristupa jeste to što kada se kapacitet potroši, prioritetan saobraćaj može biti ugrožen od strane manje prioritetnog saobraćaja. Zaključak je da u tradicionalnim mrežama jednostavno nije moguće garantovati kvalitet mrežne usluge.

Drugi pristup je uvođenje optimizacija na aplikativnom nivou ili korišćenje komunikacionih arhitektura kako bi se manje podataka slalo kroz komunikacionu infrastrukturu. Ovaj pristup svakako nije zanemarljiv ali suštinski ne rešava problem, već ga samo može eventualno ublažiti. Usled rasta mreže, količina podataka koja se transportuje u jednom trenutku opet može prevazići kapacitet komunikacione infrastrukture. Dodatno, aplikativni sloj kod tradicionalnih mreža nema uvid u stanje kompletne mreže pa stoga nije moguće vršiti optimizacije na sistemskom nivou.

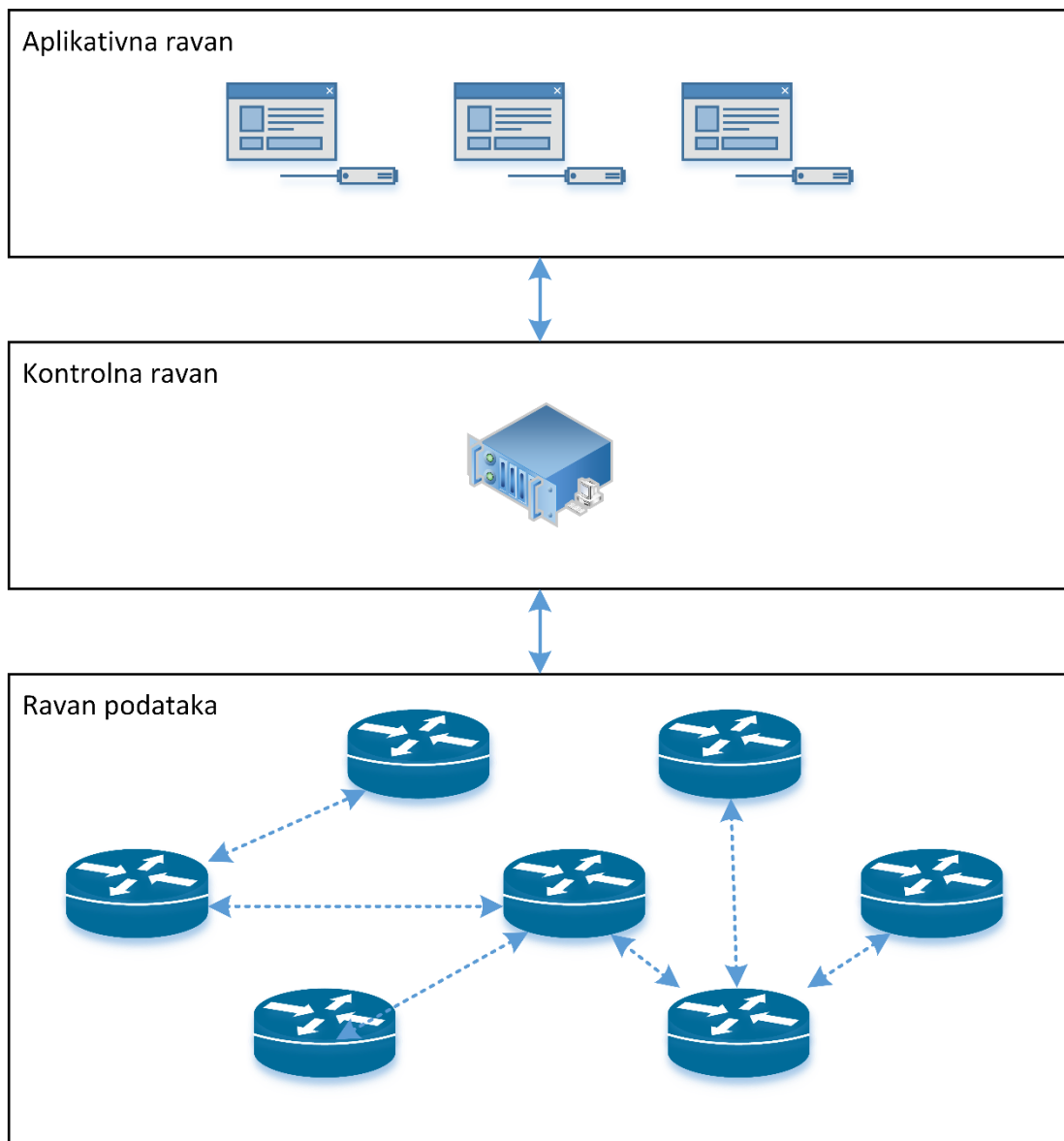
Treći pristup, koji je obrađen u ovom radu, jeste uvođenje kvaliteta usluge na infrastrukturnom nivou, za šta je neophodno odrediti prioritet podataka koji se prenose, što u pametnim mrežama svakako jeste slučaj. U radu je predstavljeno rešenje za upravljanje komunikacionom mrežom elektroenergetske pametne mreže sa promenljivim komunikacionim zahtevima, i to od strane same pametne elektroenergetske mreže.

4. Programski definisane mreže

Računarske mreže su danas uglavnom bazirane na internet protokolu. Kao što je već navedeno, internet protokol je odgovoran za adresiranje čvorova mreže, usmeravanje i fragmentaciju (ali i ponovno sklapanje) paketa (datagrama u IP terminologiji). IP mreže su izuzetno kompleksne za održavanje [72]. Ovo ilustruje primer da je tranzicija, koja je zapravo nadogradnja sa IPv4 na IPv6, započeta pre više od deset godina daleko od završene [73]. Podešavanje usmeravanja može biti statičko kada se unapred definiše kako će se usmeravati paketi ili korišćenjem nekog od protokola kao što je protokol za granične mrežne prolaze (*Border Gateway Protocol, BGP*). Održavanje IP mreže je decentralizovano i distribuirano na mrežne uređaje, arhitektura mreže prilično statična, a (re)konfiguracija podložna greškama.

Programski definisane mreže predstavljaju novu paradigmu gde se upravljanje i rukovanje podacima razdvaja u tri ravni – aplikativnu, kontrolnu i ravan podataka, što ilustruje slika 7. Aplikativna ravan je zadužena za odlučivanje o tome za koje pakete se instaliraju koja pravila. Kontrolna ravan instalira pravila nad svičevima u ravni podataka na osnovu instrukcija iz aplikativne ravni. Sa druge strane, svič na osnovu pravila koja dobija iz kontrolne ravni, odnosno od kontrolera, procesira paket. Na ovaj način, svič je izuzetno pojednostavljen jer samo sledi pravila bez uvida u stanje mreže. U slučaju da se pojavi paket za koji nema definisano pravilo, obraća se kontroleru. Pravila se definišu prema sadržaju paketa (npr. odredišna IP adresa, port, vrednost određenog dela paketa itd). Da bi ovo bilo moguće, neophodno je definisati jasne programske interfejsne kako bi se omogućila nesmetana komunikacija između različitih proizvođača opreme. Najpoznatiji ovakav standard je OpenFlow [74]. OpenFlow standard podrazumeva definisanje pravila koja mogu biti:

1. Prosleđivanje
2. Modifikacija
3. Odbacivanje paketa.



Slika 7: SDN arhitektura

Razdvajanjem funkcionalnosti mreže na kontrolnu ravan i ravan podataka omogućuje se jednostavnije upravljanje mrežom – od usmeravanja paketa, unapređenja bezbednosti, omogućavanja kvaliteta usluga do razvoja i testiranja novih mrežnih funkcionalnosti itd.

Programski definisane mreže su našle konkretnu, uspešnu primenu u industriji. U svojim računarskim centrima ih koristi Majkrosoft [28], Gugl [71] i Amazon. Koriste se za:

- centralizovano nadgledanje i upravljanje mrežom,
- inženjering mrežnog saobraćaja koji može da odgovori dinamici mreže u uobičajenim i neuobičajenim režimima rada,
- povećanje iskorišćavanja mrežne infrastrukture (kako bi se izbeglo proširenje mrežnog kapaciteta),
- jednostavniju proširivost mreže i
- unapređenje bezbednosti.

5. Dizajn i implementacija rešenja

Prilikom izrade disertacije pošlo se od pretpostavki opisanih u poglavlju 1.4-Postavka problema sa ciljem da se dođe do rešenja koje će omogućiti sledeće:

1. Dinamičko prioritetizovanje mrežnog saobraćaja
2. Dinamičko alociranje propusnog opsega
3. Dinamičko dodavanje novih OT aplikacija

Model komunikacionog podsistema korišćen u ovom radu baziran je na tipičnoj komunikacionoj infrastrukturi elektroenergetskog preduzeća opisanog u poglavlju Komunikaciona infrastruktura za pametne mreže: HAN, NAN, BN i CN. Dodatni nivo apstrakcije je uveden tako što se svaka mreža koja se povezuje sa CN može posmatrati kao suštinski odvojeni autonomni sistem, direktno prateći internet organizaciju kao skup velikog broja autonomnih sistema. Svaki autonomni sistem može biti u vlasništvu elektrodistributivne firme, iznajmljen ili čak pružen od strane odvojene kompanije kao što je provajder mobilne mreže, interneta ili telekomunikacioni sistem. Autonomni sistem svakako može biti i potpuno odvojena firma koja je unajmljena da vrši agregaciju podataka. Dakle, komunikacioni model može biti modelovan kao usmeren graf $G = (V, E)$, gde je V skup čvorova a E skup usmerenih veza. Svaka veza između čvorova $x \in V$ i $x' \in V$, $l(x, x') \in E$ ima kapacitet $c(x, x')$. Autonomni sistemi, uključujući core i utility mreže su disjunktni skupovi čvorova. Svaki čvor $x \in V$ pripada jednom i samo jednom autonomnom sistemu, što znači da je $V = \cup S_i$, gde S_i predstavlja autonomni sistem.

Prilikom modelovanja krenulo se od početne pretpostavke da je CN pod administrativnom kontrolom elektroenergetskog preduzeća, jer uglavnom nisu konformni sa mrežnom infrastrukturom koju ne poseduju iz sledećih razloga [9]:

1. Potreban im je prioritetni pristup mrežnim resursima u odnosu na ostale korisnike, posebno u kritičnim situacijama (prirodne katastrofe, loši vremenski uslovi itd.)
2. Njihova sopstvena infrastruktura je značajno otpornija jer se bazira na vlasničkim sistemima (*proprietary systems*).

Druga pretpostavka prilikom modelovanja je ta da sva mrežna oprema instalirana u CN i BN podržava SDN. Ova pretpostavka se lako može proširiti i na autonomne sisteme kako bi se benefiti i kontrolabilnost povećali.

Predloženo rešenje ima tipičnu troslojnu, SDN arhitekturu – aplikativnu ravan, kontrolnu ravan i ravan podataka koju već prikazuje slika 7. Ravan podataka vrši usmeravanje mrežnih paketa kroz mrežu na osnovu pravila koja instalira kontrolna ravan. Aplikacije pametne mreže se nalaze u aplikativnom sloju i njihov broj je proizvoljan. Konačno, kontrolni sloj je logički entitet koji se koristi da rukuje mrežnim komponentama na osnovu odluka koje donosi aplikativni sloj. U ovoj disertaciji se pretpostavlja da se rukovanje mrežom obavlja kroz SDN kontroler za pametne mreže (*engl. Smart Grid SDN Controller, SGSDNC*). SGSDNC pored standardnih SDN kontrolnih funkcija uključuje i implementaciju SG modula za donošenje odluka.

Model saobraćaja pametne mreže je objašnjen u nastavku. $A = \{a_1, \dots, a_1\}$ je lista pokrenutih SG aplikacija koje su sortirane prema prioritetu, od najvažnije do najmanje važne. Svaka privilegovana OT aplikacija $a \in A$ je definisana kao $a(b_a, E'_a, p_a)$. b_a predstavlja propusni opseg aplikacije, E'_a je skup veza koje će biti korišćene a p_a je jedinstven prioritet OT aplikacije. Dostupan kapacitet k po vezi l se računa po sledećoj formuli $k_l = c_l - \sum_{a \in A} b_a \mid l \in E'_a$. K'_a sadrži dostupne kapacitete za veze u E'_a .

5.1.1. Algoritam za dinamičko prioritetizovanje

Statičkoj alokaciji (*static provisioning*) propusnog opsega nedostaje mehanizam za adaptaciju kako bi se borila sa dinamizmom u komunikacionim mrežama [75] i pod određenim uslovima statička alokacija ne uspeva da ispoštuje rokove za saobraćaj sa visokim prioritetom. Dinamička prioritetizacija se koristi da bi se osiguralo da će se najvažniji saobraćaj favorizovati i da će se QoS poštovati [75]. Ključna ideja na kojoj je zasnovana dinamička prioritetizacija jeste dinamičko preraspoređivanje prioriteta, pri čemu se povećava značaj najvažnijeg saobraćaja kako se stanje mreže pogoršava. Algoritam 1 predstavlja kako se zahtev za dinamičko prioritetizovanje obrađuje.

```

Ulaz :    $G(V, E)$ : Model komunikacione mreže;
A: Aplikacije pametne mreže koje se izvršavaju, sortirane prema
prioritetu;
 $a(b_a, E'_a, p_a)$ : Aplikacija pametne mreže koja šalje zahtev za dinamičkom
reprioritetizacijom;
Podaci :  $A_p$ : Privilegovane aplikacije sortirane prema prioritetu
 $A_u$ : Neprivilegovane aplikacije sortirane prema prioritetu
Izlaz :   Pravila na svičevima su ažurirana prema prioritetu mrežnog
saobraćaja i ograničenjima propusnog opsega.

1 begin
2    $A_p = PraznaLista()$ 
3    $A_u = PraznaLista()$ 
4    $A.dodati\_sortirano\_prema\_prioritetu(a)$ 
5   foreach  $a \in A$  do
6     if  $TokPodataka.SeMožeDodatiKaoPrivilegovan(A_p, a) == True$ 
7       then
8          $A_p.dodati(a)$ 
9       else
10         $A_u.dodati(a)$ 
11      end
12    end
13     $ObrisatiPravilaSaSvičeva(A)$ 
14     $InstaliratiPrivilegovanaPravila(A_p)$ 
15     $InstaliratiNeprivilegovanaPravila(A_p)$ 
16  end

```

Algoritam 1: Ažuriranje pravila na svičevima

Dodavanje nove prioritetne aplikacije i/ili izmena prioriteta postojeće aplikacije sastoji se od pravljenja liste aplikacija sortiranih po prioritetu i zatim provere da li mrežne veze mogu da izdrže dodatno opterećenje, od najvažnije do najmanje važne aplikacije. Ako je moguće, aplikacija se dodaje u listu privilegovanih aplikacija. U suprotnom, dodaje se u listu neprivilegovanih aplikacija. Algoritam 2 se koristi da se odluči da li je dodavanje privilegovanog toka moguće.

Odgovarajući skup SDN pravila za usmeravanje, koja formira algoritam 1, šalju se ravni podataka, odnosno svičevima kako bi se instalirala nova pravila.

Ulaz :

A' : Aplikacije pametne mreže koje se trenutno izvršavaju;

$a(b_a, E'_a, p_a)$: Aplikacija pametne mreže koja šalje zahtev za dinamičkom reprioritetizacijom;

Podaci : K'_a : dostupni kapaciteti za veze u E'_a .

Izlaz : $P(a_m) = \begin{cases} 0, \exists K'_a, b_a > k \\ 1, \forall K'_a, b_a < k \end{cases}$: vraća 1 ako je traženi kapacitet dostupan a 0 u ostalim slučajevima.

```

1 begin
2   foreach  $k \in K'_a$  do
3     | if ( $k < b_m$ ) return 0
4   end
5   return 1
6 end

```

Algoritam 2: Odlučivanje da li se zahtev za dinamičkom reprioritetizacijom može izvršiti

5.2. Implementacija kontrolera

Kao SDN implementaciona platforma korišćen je OpenFlow sa POX kontrolerom. POX je modularna SDN platforma za razvoj SDN aplikacija u Python programskom jeziku [76]. Kontroler ima odgovornost da prima zahteve od SG aplikacionog sloja i da, u zavisnosti od odgovora modula za donošenje odluke, instalira/modifikuje/briše pravila na svičevima. Sastoji se od sledećih komponenti:

1. TCP server koji prima zahteve od aplikacionog sloja i implementira sledeći interfejs (kroz binarni protokol):

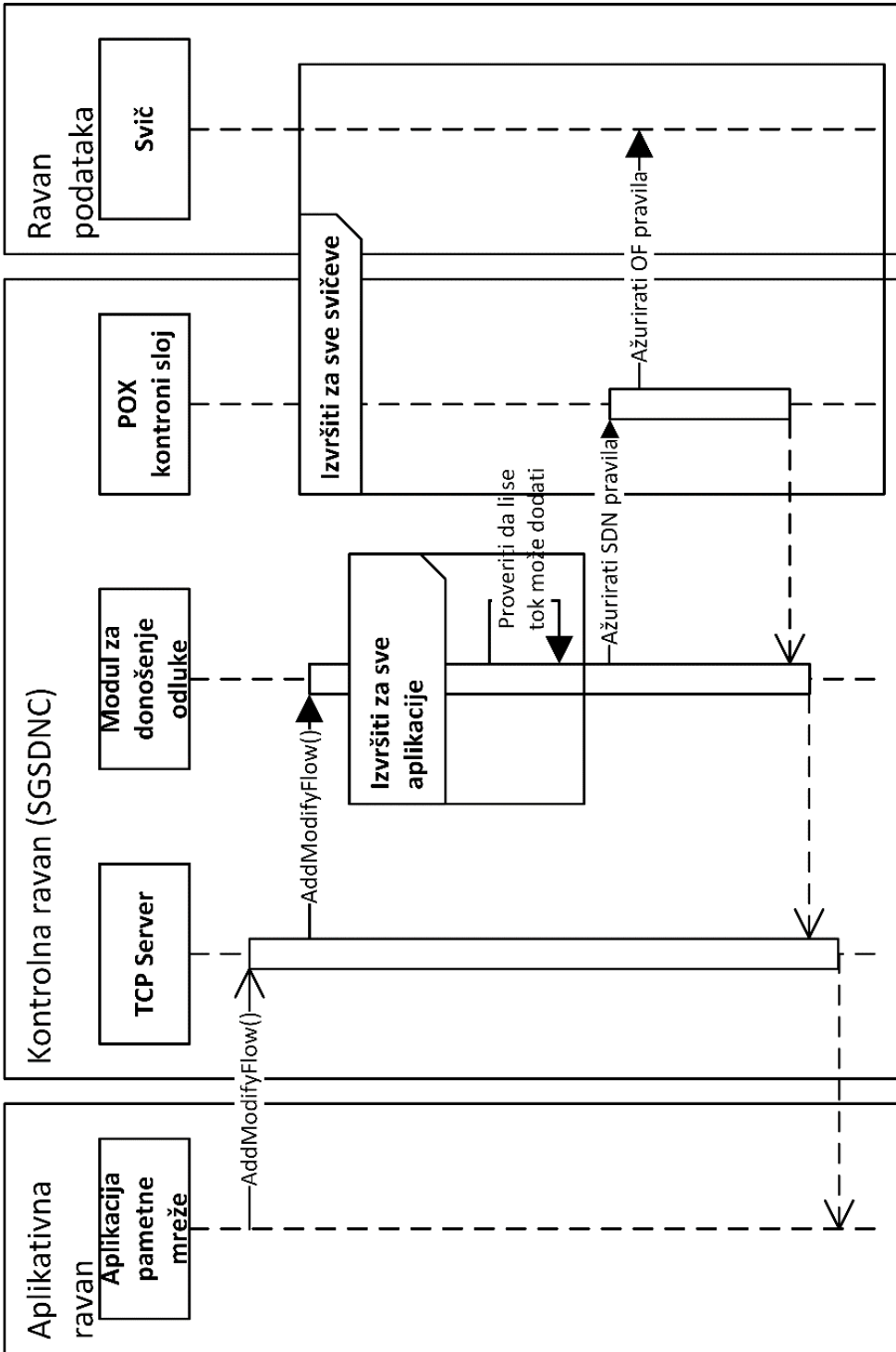
```

bool AddModifyFlow(app_type,
                    priority,
                    requested_bw,
                    links)

```

2. Modul za donošenje odluke, odgovoran je za računanje da li QoS zahtev može biti uvažan kao i da implementira algoritme 1 i 2 objašnjene ranije.
3. Kontrolni sloj zadužen za instaliranje pravila na svičevima. Kontrolni sloj koristi POX da bi komunicirao sa svičevima preko OpenFlow protokola.

Interakciju između komponenti kontrolera prikazuje slika 8.



Slika 8: Interakcija između komponenti rešenja

Modul za donošenje odluke implementira algoritme 1 i 2 u Python programskom jeziku. Kompleksnost algoritma je niska, $O(n)$, gde je n broj afektovanih veza. SGSDNC prima i obrađuje zahteve za promenu prioriteta koje šalju aplikacije pametne mreže SG. Zahtev se sastoji od: tipa aplikacije, prioriteta, traženog dostupnog mrežnog saobraćaja i skupa veza koje će biti korišćene. Na osnovu te informacije modul za donošenje odluka računa da li sve veze mogu da izdrže dodatno opterećenje bez degradiranja trenutno obezbeđenog QoS. Ako mogu, pravilo da se dodatni saobraćaj tretira kao privilegovan instalira se na svičeve od strane kontrolera. Celokupan spisak aplikacija, spisak privilegovanih i nepriviligovanih aplikacija, čuva se u sortiranim listama.

Ažuriranje tabele tokova podataka na svičevima se vrši slanjem poruke za modifikaciju toka podataka OFPT_FLOW_MOD (*Modify Flow Entry Message*). OFPT_FLOW_MOD poruka ima format koji prikazuje listing 1 [77].

```
struct ofp_flow_mod
{
    struct ofp_header header;
    struct ofp_match match;
    uint64_t cookie;

    uint16_t command;
    uint16_t idle_timeout;
    uint16_t hard_timeout;
    uint16_t priority;
    uint32_t buffer_id;
    uint16_t out_port;
    uint16_t flags;
    struct ofp_action_header actions[0];
};
```

Listing 1: Definicija OFPT_FLOW_MOD poruke

Sledi objašnjenje polja od interesa. Polje `match : : ofp_match` se koristi da bi se jednoznačno odredio tok podataka na koji se odnosi pravilo opisano na osnovu dolaznog porta sviča, MAC adrese izvora i odredišta, IP adrese izvora i odredišta, TCP/UDP porta izvora i odredišta itd. U disertaciji se pravila za razlikovanje prioriternih od neprioriternih tokova podataka formiraju na osnovu IP adrese i TCP porta. Prikaz polja `ofp_match` strukture prikazuje listing 2.

```
struct ofp_match
{
    uint32_t wildcards;
    uint16_t in_port;
    uint8_t dl_src[OFPT_ETH_ALEN];
    uint8_t dl_dst[OFPT_ETH_ALEN];
```

```

uint16_t dl_vlan;
uint8_t dl_vlan_pcp;
uint8_t pad1[1];
uint16_t dl_type;
uint8_t nw_tos;
uint8_t nw_proto;
uint8_t pad2[2];
uint32_t nw_src;
uint32_t nw_dst;
uint16_t tp_src;
uint16_t tp_dst;
};

```

Listing 2: Definicija ofp_match strukture

Polje `ofp_flow_mod::command` predstavlja komandu koja će se izvršiti nad tokom podataka opisanog `ofp_flow_mod::match` strukturom. Tipove komandi prikazuje listing 3.

```

enum ofp_flow_mod_command
{
    OFPFC_ADD,
    OFPFC_MODIFY,
    OFPFC_MODIFY_STRICT,
    OFPFC_DELETE,
    OFPFC_DELETE_STRICT
};

```

Listing 3: Komande koje podržava ofp_flow_mod poruka

OFPFC_ADD komanda se odnosi na dodavanje novog pravila, OFPFC_MODIFY na izmene postojećih pravila koja odgovaraju `ofp_flow_mod::match` polju, podrazumeva izmene striktno prema `ofp_flow_mod::match::wildcards` filteru. OFPFC_DELETE i OFPFC_DELETE_STRICT podrazumevaju brisanje pravila koja odgovaraju: (1) `ofp_flow_mod::match` i (2) `ofp_flow_mod::match::wildcards` i prioritetu, respektabilno. Pravila su instalirana OFPFC_ADD komandom, što je za POX podrazumevana komanda kad se instancira `ofp_flow_mod` poruka bez specificirane komande, dok se OFPFC_DELETE komanda eksplicitno navodi kada je potrebno brisati pravila.

`ofp_flow_mod::idle_timeout` predstavlja vreme posle kog pravilo prestaje da važi ukoliko nije naišao paket koji pripada opisanom toku podataka, dok `ofp_flow_mod::hard_timeout` predstavlja koliko dugo pravilo važi. Oba vremena su izražena u sekundama.

`ofp_flow_mod::actions` predstavlja akciju koja će se izvršavati nad tokom podataka opisanog `ofp_flow_mod::match` poljem. Precizira se port na koji paket treba da se prosledi kao i odgovarajući red preko `ofp_action_enqueue::queue_id` polja. U slučaju da tok

podataka treba tretirati kao privilegovan, koristi se identifikator reda za privilegovan saobraćaj, dok se u suprotnom koristi identifikator reda za običan saobraćaj. Listing 4 prikazuje definiciju ofp_action_enqueue strukture.

```
struct ofp_action_enqueue
{
    uint16_t type;
    uint16_t len;
    uint16_t port;
    uint8_t pad[6];
    uint32_t queue_id;
};
```

Listing 4: Definicija ofp_action_enqueue strukture

Detaljan format i opis OpenFlow protokola se može pronaći u [77].

Pravila se ažuriraju relativno retko, na osnovu zahteva operatora ili stanja pametne mreže. Dve OFPT_FLOW_MOD poruke se šalju ka svim svičevima za svaki tok podataka. Jedan da obriše tok podataka (sa OFPFC_DELETE komandom) a drugi da ga doda sa odgovarajućim prioritetom (OFPFC_ADD komandom). Ažuriranje pravila je reda veličine oko 160 bajtova po pravilu, pa se može zaključiti da je kontrolni saobraćaj skroman i da ne utiče značajno na podatke koji idu kroz mrežu.

Kontroler tretira svaki tok podataka kao odvojenu klasu saobraćaja i podržani su različiti tipovi tokova saobraćaja. Ovako je prvi zahtev R1 adresiran. Kontroler pokriva zahtev R2 tako što omogućuje promenu prioriteta toka podataka naknadnim pozivima AddModifyFlow() funkcije. I konačno, zahtev R3 tako što je moguće pozivati AddModifyFlow() funkciju naknadno, navodeći nove zahteve po pitanju propusnog opsega.

6. Platforma za evaluaciju rešenja

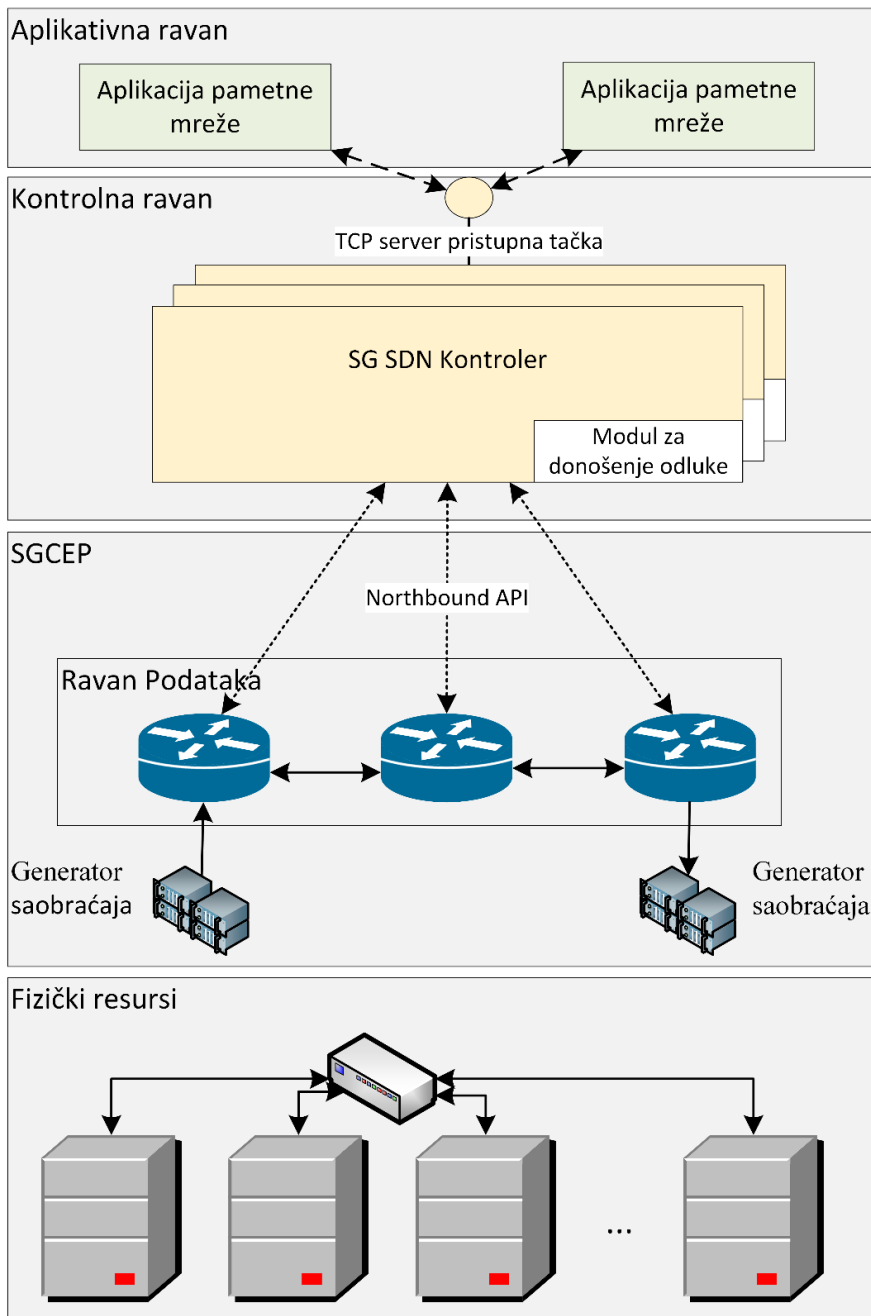
Da bi se izvršila verifikacija rešenja razvijena je platforma za evaluaciju komunikacione infrastrukture za pametne mreže (engl. *Smart Grid Communication Evaluation Platform, SGCEP*). Platforma je bazirana na Mininet [78] rešenju i prikazuje je slika 9. Mininet platforma za simulaciju računarskih mreža razvijena u Pajton programskom jeziku koristi virtuelizaciju na nivou operativnog sistema i pruža emulaciono okruženje. Oslanja se na mrežni sloj Linux operativnog sistema kao i izolaciju procesa na nivou sistema za upravljanje datotekama (*file-system level process isolation*), *chroot*. *Chroot* se inače koristi za testiranje i razvoj aplikacija jer omogućava promenu baznog (*root*) direktorijuma aplikacije i svih aplikacija koje ona pokrene. Kako opterećenje procesora, memorije i diska može da prevaziđe performanse jednog računara, na raspolaganju je i Mininet Cluster [79] izdanje Mininet okruženja koje omogućava distribuciju emuliranih računara i čvorova mreže na više različitih računara. Slika 10 (a) prikazuje primer mreže sa šest računara i tri sviča. Mininet Cluster će rasporediti ove čvorove mreže na više računara u skladu sa algoritmom za raspoređivanje. Ovo podrazumeva sečenje komunikacione topologije na više računara. Slika 10 (b) ilustruje primer raspoređivanja Mininet čvorova po računarima unutar Mininet klastera. Podržani su sledeći algoritmi za raspoređivanje čvorova:

1. *RandomPlacer*, koji nasumično raspoređuje Mininet čvorove po računarima u klasteru [80].
2. *SwitchBinPlacer*, koji čvorove raspoređuje u jednake grupe, ravnomerno opterećujući računare u klasteru ali pokušavajući da Mininet računare smesti zajedno sa njihovim svičevima.
3. *RoundRobinPlacer*, koji Mininet čvorove raspoređuje kružno po dostupnim računarima u klasteru.

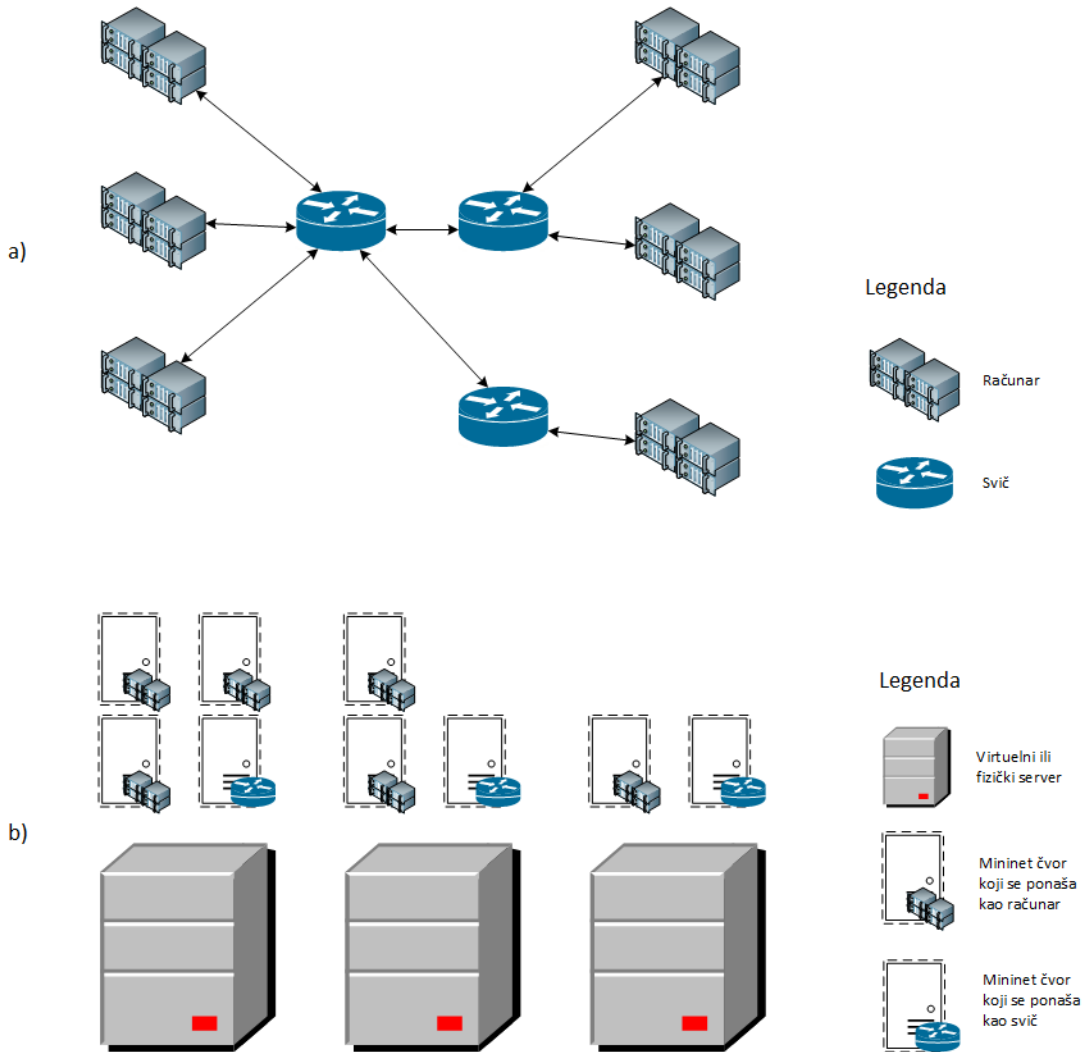
U ovom radu je korišćen *RoundRobinPlacer* jer je svaki Mininet čvor izvršavan na posebnom računaru u klasteru, uključujući i SDN kontroler.

Razmatrano je korišćenje *fs-sdn* simulatora za analizu performansi [81]. Simulator *fs-sdn* pruža simulaciju mreže pogodnu za velike mreže jer nije zahtevan iz ugla resursa računara i

vrši je brže nego u realnom vremenu [81]. Funkcioniše tako što umesto sistemskih funkcija, poziva svoje. Mininet je odabran zato što je prihvaćen u istraživačkoj zajednici, podržan i dokumentovan velikim brojem primera.



Slika 9: Arhitektura platforme za evaluaciju



Slika 10: (a) Primer kominukacione topologije, (b) Raspoređivanje Mininet čvorova

Uloga SGCEP okruženja je da:

1. Automatizuje konfiguraciju čvorova
2. Konfiguriše Mininet okruženje na osnovu tražene topologije komunikacione infrastrukture pametne mreže
3. Izvrši željenu emulaciju
4. Prikupi rezultate i eventualno izvrši parsiranje rezultata kako bi se analiza ubrzala.

Rešenje se može pokretati na bilo kom skupu Linux računara – fizičkih ili virtuelnih. SGCEP uključuje: (a) konfiguraciju okruženja, (b) izvršavanje testova, (c) generatore saobraćaja i (d) sakupljanje i obradu rezultata.

6.1. Konfiguracija okruženja

Emulacija se pokreće na više čvorova koje je neophodno adekvatno podesiti. Ovo se izvršava pokretanjem skripata i podrazumeva sledeće:

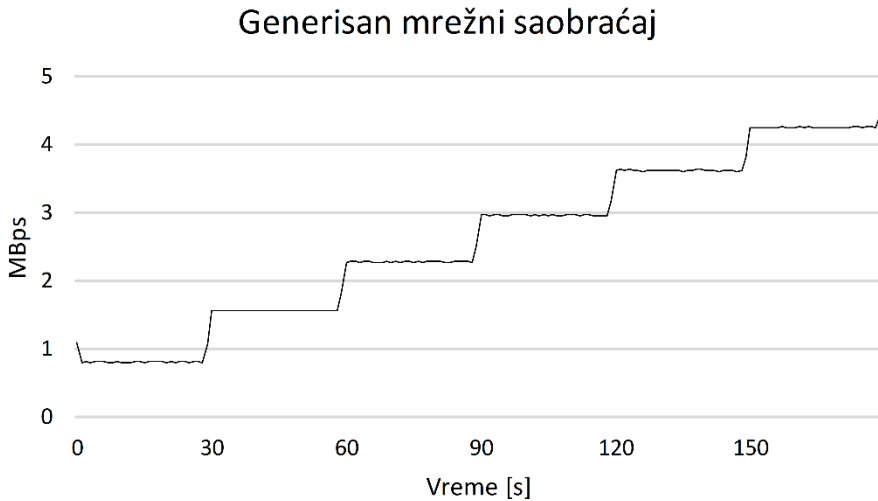
1. Razmenu javnog ključa između svih čvorova kako bi se omogućio njihov međusoban pristup preko SSH protokola. Ovo je neophodno jer se Mininet Cluster izdanje oslanja na SSH tunele između čvorova kako bi komunicirali. Ovo podrazumeva distribuciju fajlova potrebnih za SSH podešavanje na sve čvorove, zatim razmena ključa svakog čvora sa svim čvorovima. Proces je podeljen u nekoliko BASH skripata.
2. Kompajliranje i distribuiranje izvršnih i konfiguracionih fajlova na sve servere od interesa kako bi se izvršavao uvek ažuran kod.
3. Pokretanje monitoringa mreže korišćenjem NetFlow procesa, nfdump, na svakom serveru kako bi se sačuvale informacije o tokovima podataka koji prolaze kroz mrežu. NetFlow je mrežni protokol za prikupljanje IP informacija u mreži koji je razvio Cisco. Informacije od interesa su: broj paketa poslatih i primljenih po toku podataka po jedinici vremena, količina poslatih i primljenih bajtova, IP adresa i port izvora i odredišta. SGCEP se oslanja na NetFlow kao osnovni alat za merenje performansi. Sastoji se od sledećih komponenti: (a) izvora NetFlow paketa merenja, (b) aplikacije za snimanje NetFlow paketa merenja i (c) aplikacije za parsiranje i analizu podataka. NetFlow protokol je UDP baziran i kako UDP ne garantuje sigurnu isporuku prilikom ekstremnog opterećenja mreže, povećava se šansa da će se paketi izgubiti. Cilj testova je da se vidi ponašanje mreže u ekstremnom preopterećenju. Kako bi se izbeglo gubljenje NetFlow paketa, odstupilo se od uobičajene prakse da se NetFlow paketi sakupljaju na jednom čvoru, već se sakupljaju na svakoj Linux mašini posebno. Moguće je iskoristiti postojeće rešenje da se NetFlow paketi tretiraju kao prioritetni, međutim to izlazi iz okvira ove disertacije.

6.2. Izvršavanje testova

Model komunikacione topologije pametne mreže je implementiran u Pajton programskom jeziku i obuhvata topologiju same komunikacione mreže i tokove podataka između čvorova.

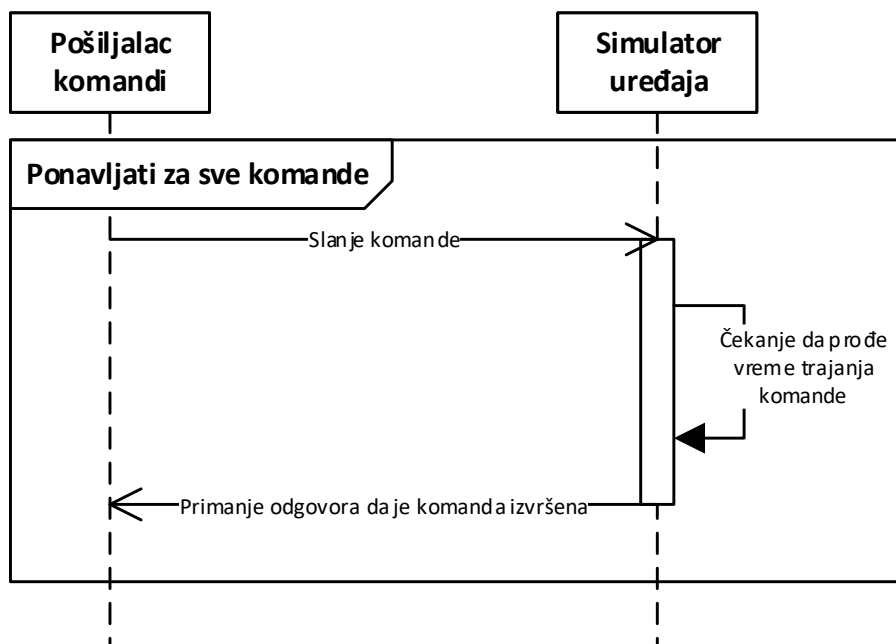
Mrežna topologija sa opisom eksperimenta (trajanje testa, adresa kontrolera koji će se koristiti) koristi se kao argument za SGCEP i nakon toga se prolazi kroz sledeće faze:

1. Formiranje Mininet mreže nad Mininet klasterom bazirane na prosleđenom testu. Koristi se Mininet biblioteka napisana na Pajton programskom jeziku.
2. Konfiguracija propusnog opsega veza između svičeva. Postoje dva pristupa kod ograničavanja propusnog opsega veza između svičeva: (1) sečenje saobraćaja (*traffic policing*) i (2) oblikovanje saobraćaja (*traffic shaping*). Sečenje saobraćaja podrazumeva praćenje brzine dolaska paketa i kada paketi stignu većom brzinom od podešene – odbacuje se višak. Ograničenje ovog pristupa je to što će povremene vršne vrednosti (*peak*) odseći i u zavisnosti od protokola koji se koristi za komunikaciju, može aktivirati mehanizme za izbegavanje zagušenja mreže (*congestion avoidance*), što će se desiti sa TCP protokolom. Oblikovanje saobraćaja podrazumeva korišćenje reda (*queue*) kako bi se amortizovale povremene vršne vrednosti bez naglog sečenja. Primarna prednost ovog pristupa je to što neće obarati performanse TCP protokola aktivacijom mehanizma za izbegavanje zagušenja, što je zapravo smanjenje tempa slanja podataka. Mininet koristi Open vSwitch[82] instance za svičeve kao podrazumevano rešenje, što je korišćeno u ovoj disertaciji. Ograničenje propusnog opsega na ulazu u svič se vrši sečenjem saobraćaja, a na izlazu pravljenjem redova sa ograničenim propusnim opsegom. Jednostavna alternativa za ograničavanje propusnog opsega je Linux kontrola saobraćaja (*Linux Traffic Control, tc*), koju međutim Mininet Cluster ne podržava. OpenFlow v3.0 podržava i tabele merenja za kontrolu propusnog opsega[83][84]. Radi se o definisanju jednostavnih pravila o maksimalnoj frekvenciji prolaska paketa kroz svič. Razlika u odnosu na definisanje redova je to što se redovi definišu po portu na sviču, dok se stavke u tabeli metrika definišu po toku podataka. U izradi disertacije nisu korišćene tabele merenja jer POX kontroler podržava OpenFlow v1.0, a Open vSwitch je naknadno pružio podršku.
3. Pravljenje redova na svičevima kako bi se postiglo obezbeđivanje kvaliteta usluge. Open vSwitch podržava pravljenje redova sa ograničenjem maksimalnog i minimalnog propusnog opsega. Ovaj mehanizam se koristi da bi se prioritetan saobraćaj izolovao od neprioritetnog. Odluku o tome koji je saobraćaj prioritetan a koji nije svič dobija od kontrolera. Informacije o tokovima podataka se dobijaju od svičeva korišćenjem NetFlow protokola sa frekvencijom od jedne sekunde.
4. Pokretanje generatora saobraćaja na odgovarajućim čvorovima mreže.



Slika 12: Primer generisanog saobraćaja na osnovu CSV datoteke

Generator komandi izvršava sinhrono pozive sa određenom periodom uz merenje komunikacionog vremena potrebnog za slanje i primanje komande. Trajanje komandi je konfigurabilno. Ovaj simulator se koristi za simulaciju izvršavanja bilo kakvih komandi na terenu – obično SCADA komandi. Sve parametre generatori saobraćaja dobijaju preko komandne linije i uglavnom su to odredišna IP adresa i port, karakteristike mrežnog saobraćaja itd. Generator komandi se sastoji od dve aplikacije – pošiljaoca komandi i simulatora uređaja. Slika 13 pokazuje dijagram sekvenci generatora saobraćaja komandi koji ilustruje opisan način rada.



Slika 13: Dijagram sekvenci generatora saobraćaja komandi

Slika 14 prikazuje Wireshark isečak za simulaciju u kojoj je pošiljalac komandi na IP adresi 10.0.0.4 i portu 36748, a simulator uređaja na IP adresi 10.0.0.3 i portu 9000. Podešeno je trajanje komandi od 1.8s, veličina komande je 1KB, a odgovor 512B. Može se videti da je komanda poslata kroz poruku 12, a odgovor primljen kroz poruku 25. Vremenska razlika između ove dve poruke je 1.804s. Mogu se uočiti i dve dodatne poruke, broj 10 i 23. Radi se o porukama koje su deo aplikativnog protokola – pre bilo kakve poruke, prvo se šalje veličina poruke koja se šalje kako bi odredišna strana znala koliko podataka da očekuje, dok sadržaj poruke tumači poslovna logika. U isečku se nalaze tri komandne sekvence.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
10	0.698908	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	70	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=517 Win=237 Len=4 TSval=2420143 TSecr=2420867
11	0.699740	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=517 Ack=5 Win=61 Len=0 TSval=2420894 TSecr=2420143
12	0.699756	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	1090	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=5 Ack=517 Win=237 Len=1024 TSval=2420143 TSecr=2420894
13	0.700635	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=517 Ack=1029 Win=65 Len=0 TSval=2420894 TSecr=2420143
23	2.503427	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	70	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=517 Ack=1029 Win=65 Len=4 TSval=2421345 TSecr=2420143
24	2.503451	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	66	36748 → 9000 [ACK] Seq=1029 Ack=521 Win=237 Len=0 TSval=2420594 TSecr=2421345
25	2.504259	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	578	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=521 Ack=1029 Win=65 Len=512 TSval=2421345 TSecr=2420594
26	2.504280	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	66	36748 → 9000 [ACK] Seq=1029 Ack=1033 Win=245 Len=0 TSval=2420594 TSecr=2421345
31	2.699016	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	70	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=1029 Ack=1033 Win=245 Len=4 TSval=2420643 TSecr=2421345
32	2.699836	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=1033 Ack=1033 Win=65 Len=0 TSval=2421394 TSecr=2420643
33	2.699857	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	1090	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=1033 Ack=1033 Win=245 Len=1024 TSval=2420643 TSecr=2421394
34	2.700791	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=1033 Ack=2057 Win=69 Len=0 TSval=2421394 TSecr=2420643
41	4.503540	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	70	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=1033 Ack=2057 Win=69 Len=4 TSval=2421845 TSecr=2420643
42	4.503564	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	66	36748 → 9000 [ACK] Seq=2057 Ack=1037 Win=245 Len=0 TSval=2421094 TSecr=2421845
43	4.504410	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	578	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=1037 Ack=2057 Win=69 Len=512 TSval=2421094 TSecr=2421845
44	4.504431	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	66	36748 → 9000 [ACK] Seq=2057 Ack=1549 Win=254 Len=0 TSval=2421094 TSecr=2421845
49	4.699129	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	70	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=2057 Ack=1549 Win=254 Len=4 TSval=2421143 TSecr=2421845
50	4.699943	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=1549 Ack=2061 Win=69 Len=0 TSval=2421894 TSecr=2421143
51	4.699959	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	1090	36748 → 9000 [PSH, ACK] Seq=2061 Ack=1549 Win=254 Len=1024 TSval=2421143 TSecr=2421894
52	4.700942	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	66	9000 → 36748 [ACK] Seq=1549 Ack=3085 Win=73 Len=0 TSval=2421894 TSecr=2421143
57	6.503788	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	70	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=1549 Ack=3085 Win=73 Len=4 TSval=2422345 TSecr=2421143
58	6.503816	10.0.0.4	10.0.0.3	TCP	66	36748 → 9000 [ACK] Seq=3085 Ack=1553 Win=254 Len=0 TSval=2421594 TSecr=2422345
59	6.504624	10.0.0.3	10.0.0.4	TCP	578	9000 → 36748 [PSH, ACK] Seq=1553 Ack=3085 Win=73 Len=512 TSval=2422345 TSecr=2421594

Slika 14: Wireshark isečak

Oba generatora saobraćaja periodično ispisuju veličinu prozora zagušenja, broj izgubljenih paketa kao i onih koji su ponovo poslani. Ove informacije se po utičnici (*socket*) dobijaju funkcijom *getsockopt*.

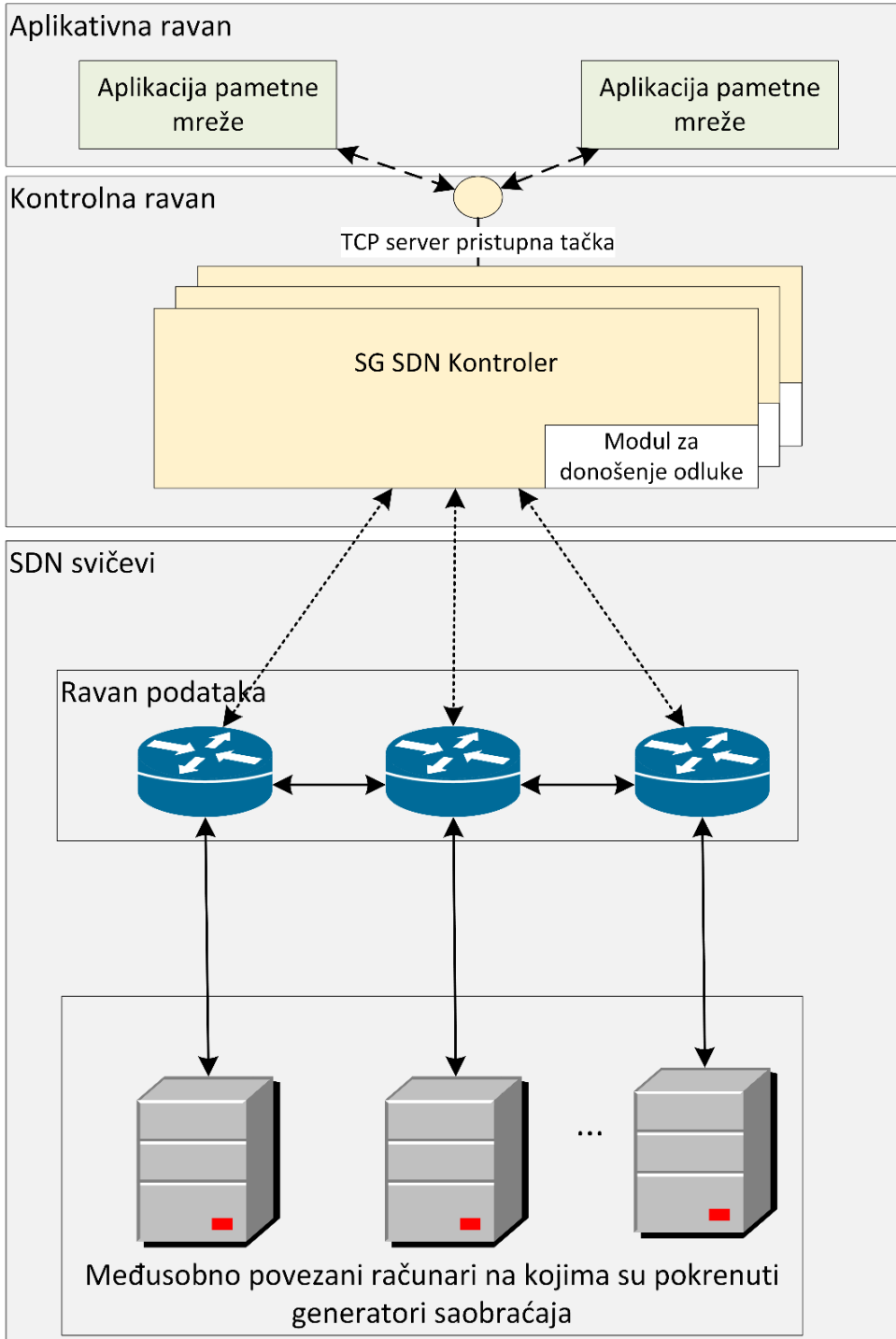
6.4. Sakupljač rezultata

Skup skripata koje omogućuju sakupljanje podataka podrazumeva sledeće: (1) zaustavljanje NetFlow kolektora kako bi se svi podaci koji su sakupljeni a nalaze se u internoj prihvatnoj memoriji sačuvali na disk; (2) konverziju binarnih NetFlow rezultata u tekstualne (*comma separated values, CSV*) fajlove kako bi se jednostavnije analizirali; (3) njihovo kopiranje zajedno sa informacijama koje čuvaju generatori saobraćaja na lokalni računar kao arhivu, za dalju analizu.

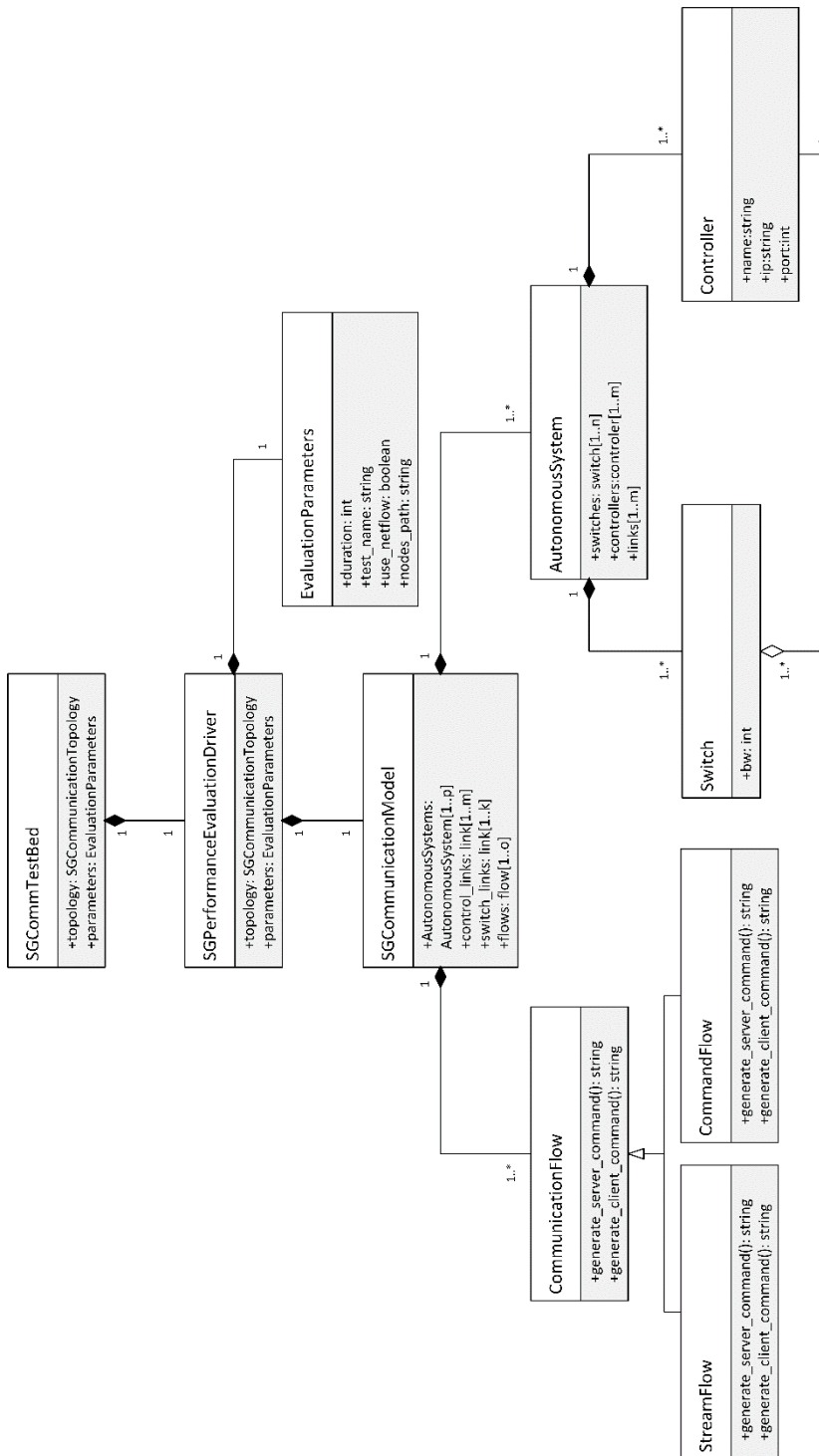
Kao što je već objašnjeno, očekivano je da kontroler instrukcije dobija od aplikacija pametne mreže. Da bi se proverila funkcionalnost kontrolera, razvijena je testna aplikacija koja omogućava slanje komandi kontroleru i cilj joj je da emulira aplikaciju pametne mreže, na primer da promeni prioritet AMI saobraćaja.

SGCEP omogućava da se isti testovi više puta izvršavaju, a ručne akcije minimizuju. Generatori omogućuju da se emulira realno mrežno opterećenje sa tipičnim funkcijama potrošnje propusnog opsega kako bi se testovima potvrdila sva tri zahteva navedena u poglavlju 1. Na kraju, ponašanje SGSDNC je verifikovano uvidom u rezultate samih testova. SGCEP je tako razvijen da je moguće dodavati nove generatore saobraćaja – razvijati ih ili uključiti postojeće (na primer test aplikacija za OpenDNP3 biblioteku [85]). Nije moguće menjati topologiju mreže u toku rada.

Posebno se naglašava da se SGSDNC može direktno koristiti sa SDN svičevima bez SGCEP rešenja, što ilustruje slika 15, i da su takođe podržani višestruki kontroleri. Ova disertacija testovima potvrđuje samo rad sa jednim kontrolerom. Izvorni kod za SGCEP i SGSDNC je dostupan na [86]. Detaljan UML dijagram modela podataka prikazuje slika 16. Na vrhu hijerarhije se nalazi sama aplikacija, *SGCommTestBed*. *SGPerformanceEvaluationDriver* predstavlja komponentu koja vrši orkestraciju izvršavanja testova – inicijalizaciju, konfiguraciju mreže i pokretanje samog testa. *SGCommunicationModel* je model komunikacione mreže a sastoji se od autonomnih sistema (*AutonomousSystem*) kojima pripadaju kontroleri (*Controller*) i svičevi (*Switch*). Tokovi podataka su modelovani apstraktnom klasom *CommunicationFlow* koja ima implementaciju generatora toka podataka (*StreamFlow*) i generatora komandi (*CommandFlow*). Model je takav da je jednostavno dodavanje novih tokova podataka.



Slika 15: Korišćenje SGSDNC direktno sa SDN svičevima



Slika 16: UML dijagram SGCEP

7. Test rezultati

SGCEP je pokrenut nad ORBIT testnim okruženjem [87] na Ratgers univerzitetu. Korišćena je Mininet 2.2.1 verzija na Ubuntu 14.04 operativnom sistemu. Svaki entitet (generator saobraćaja, svič, kontroler) pokretan je na odvojenom fizičkom računaru sledeće konfiguracije: Intel i7 procesor, 8-16GB RAM dok je mreža između čvorova 1Gbps. Emulacija je pokretana nad 34 računara. Kao što navodi [9], veći deo podataka koji će se sakupljati u pametnim mrežama nije neophodan za trenutnu kontrolu mreže. To znači da je potrebno favorizovati samo najvažnije podatke po pitanju propusnog opsega i kašnjenja podataka, dok se saobraćaj nižeg prioriteta može slati onda kada postoji dostupan propusni opseg za to i tempom koji je moguć. Dinamika pametne mreže je posmatrana sa dva aspekta:

1. Promenljive količine podataka koja se šalje: količina podataka koja se prenosi zavisi od više faktora – perioda dana, dana u nedelji, meseca u godini, vremenskih prilika i sličnih faktora okruženja;
2. Ograničenog kapaciteta komunikacione mreže: kupovina kapaciteta unapred se, uz zadovoljavanje potreba vršne potrošnje, zaobilazi i dostupan propusni opseg se koristi u najvećoj meri, uzimajući u obzir prioritet saobraćaja i poštujući nesmetano izvršavanje prioriteta aplikacija pametne mreže.

Na osnovu navedenih zahteva mrežnog saobraćaja za pametne mreže, saobraćaj je podeljen u četiri klase gde svaka ima određeni prioritet. Mrežni saobraćaj svake grupe generišu generatori saobraćaja na sledeći način:

1. AGC saobraćaj generiše komandni generator saobraćaja;
2. VVO saobraćaj takođe generiše komandni generator saobraćaja;
3. SCADA saobraćaj se šalje konstantnom brzinom od 1KBps po transformatorskoj oblasti;
4. PMU saobraćaj je estimiran na stalnih 10KBps po transformatorskoj oblasti što je zasnovano na vrednostima objavljenim u [88];

5. AMI saobraćaj je računat na osnovu formule objavljene u [89] gde je λ broj bajtova po sekundi, Z broj pametnih brojila, P veličina paketa pametnog brojila, a t frekvencija generisanja paketa po minuti:

$$\lambda = \frac{Z \times P}{60 \times t}$$

Ovom formulom se podrazumeva da pametna brojila neće istovremeno slati poruke, već da će raspodela slanja poruka biti uniformna. Kako je navedeno u [89], veličina poruke koju šalje pametno brojilo P je 512 bajtova u postojećim standardima. Period za generisanje poruka t varira i može biti 5, 15, 30 i 60 minuta. U ovoj disertaciji za sve testne slučajeve, sem za poslednji, koristi se period generisanja poruka od 5 minuta. U poslednjem testnom slučaju je period uzorkovanja 15s nad jednim delom mreže, dok je nad ostatkom uobičajenih 5 minuta, što je detaljnije objašnjeno u samom testnom slučaju. Tabela 2 sumira kilobajte po sekundi za različite broj pametnih brojila i periode generisanja poruka u zavisnosti od broja potrošača i perioda generisanja poruka.

6. Pozadinski saobraćaj se generiše na različite načine, u zavisnosti od scenarija.

Tabela 2: AMI saobraćaj u KBps

Broj potrošača	Period generisanja poruka [min]			
	5	15	30	60
5 000	8.3	2.8	1.4	0.7
10 000	16.7	5.5	2.8	1.4
20 000	33.2	11.1	5.5	2.78
40 000	66.7	22.1	11.1	5.5

Mrežna topologija je bazirana na osnovu nekoliko opština Srbije, a broj potrošača je estimiran na osnovu broja domaćinstava prema popisu stanovništva po naseljima Republike Srbije iz 2011. godine [90]. Broj transformatorskih oblasti je izračunat pod pretpostavkom da po jednoj transformatorskoj oblasti postoji 10.000 potrošača (što je uobičajen broj potrošača u SCADA sistemima za ADMS). Podela broja potrošača na transformatorske oblasti, autonomne sisteme i gradove Srbije prikazuje tabela 3.

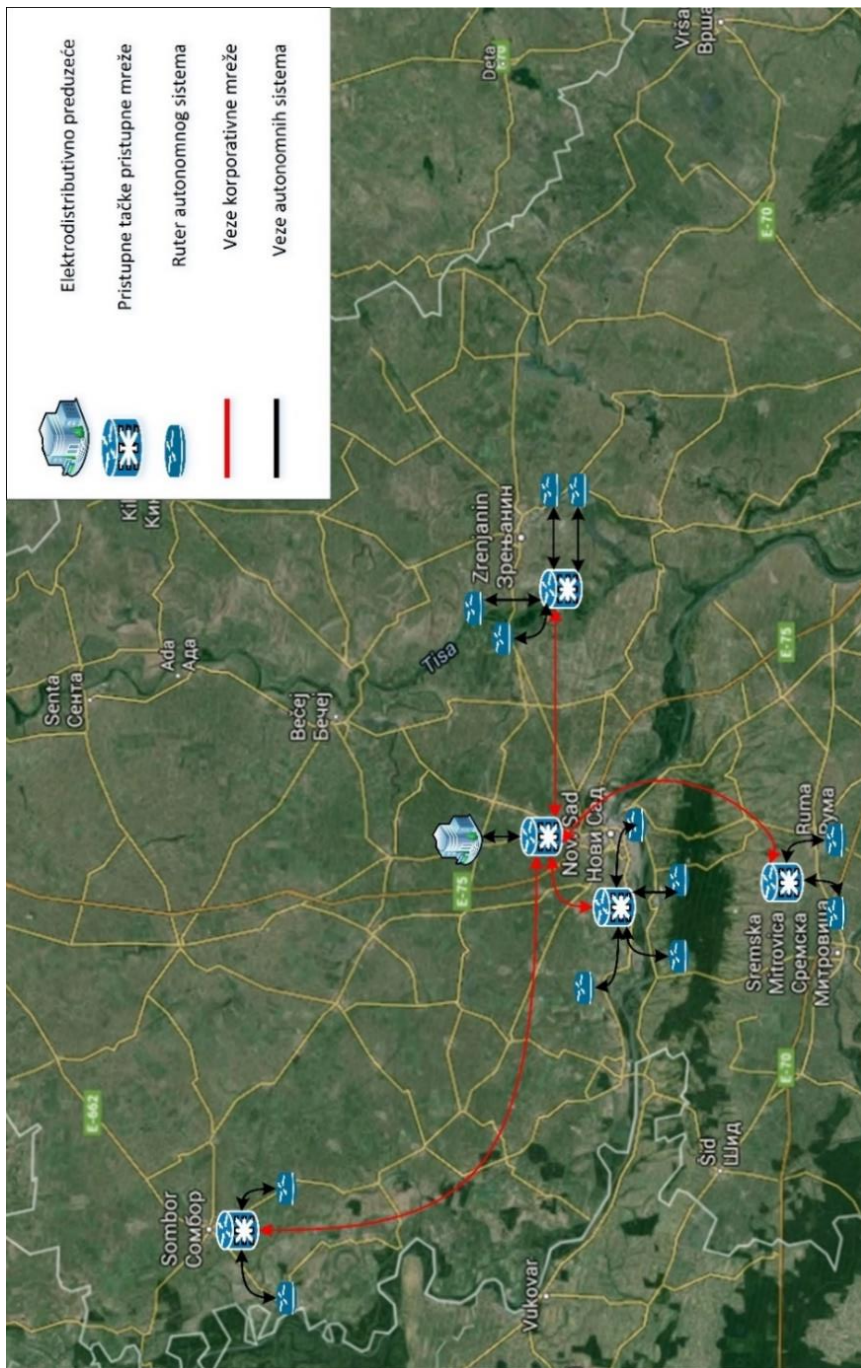
Tabela 3: Estimirani broj potrošača po oblastima

Grad	Broj potrošača	Transformatorske oblasti	Autonomni sistemi
Novi Sad	120 000	12	4
Zrenjanin	45 000	4	4
Sombor	35 000	6	2
Sremska Mitrovica	27 000	4	2

Tabela 3 je korišćena za formiranje testne topologije. Lokacije gradova na mapi i primer komunikacione infrastrukture prikazuje slika 17. Svaki od četiri grada je pokriven odvojenim autonomnim sistemom. Slika 18 prikazuje komunikacionu topologiju od 12 autonomnih sistema, koja pokriva geografske oblasti četiri grada: Novi Sad, Zrenjanin, Sombor i Sremsku Mitrovicu. Ona je korišćena u svim testnim slučajevima sem u testnom slučaju T2, za koji je korišćena testna topologija predstavljena u samom testu.

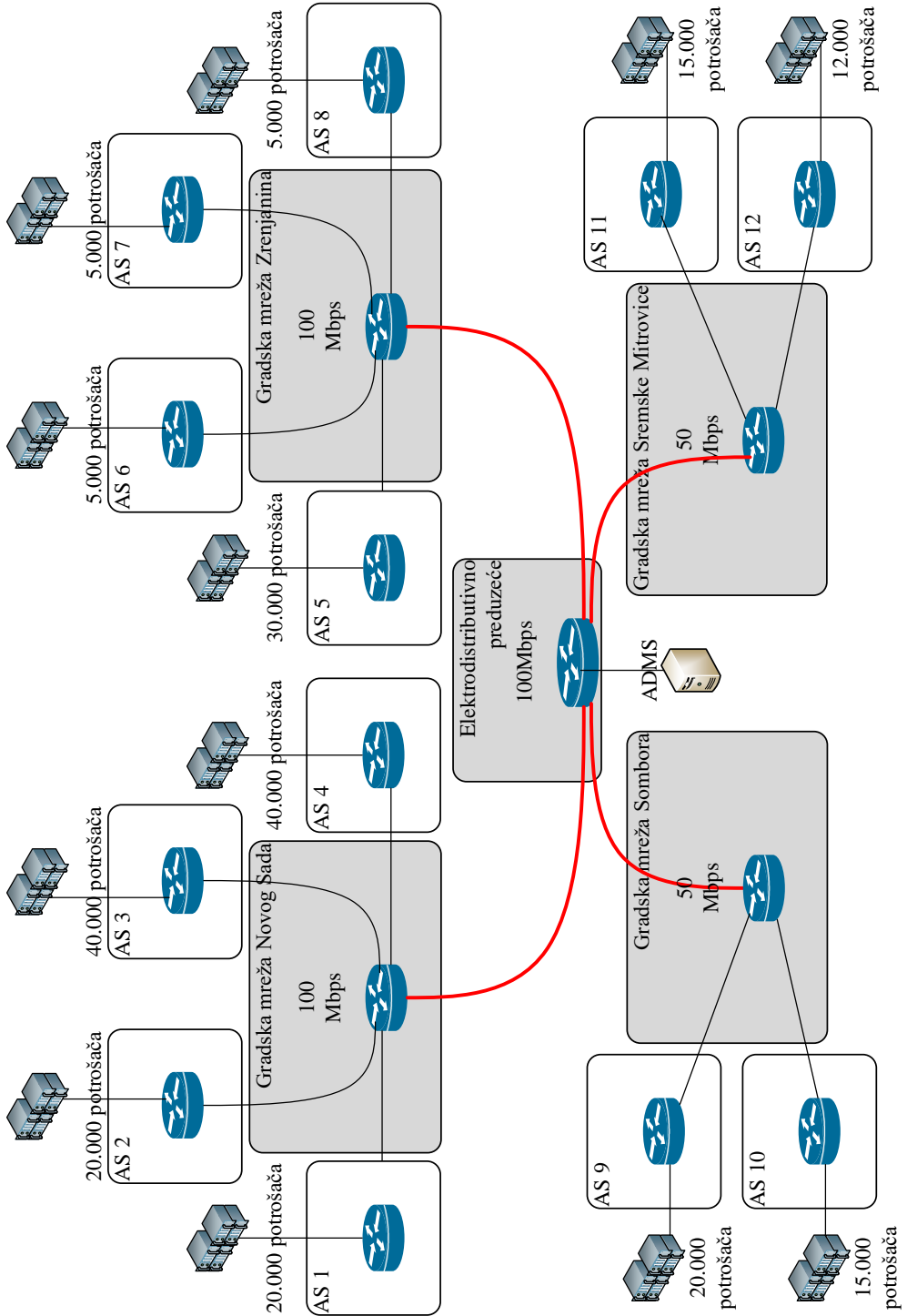
Svi testni slučajevi su izvršeni sa dva kontrolera. Mreža kojom upravlja SGSDNC je referencirana kao SDN bazirani QoS. Pod tradicionalnom mrežom se podrazumeva IP mreža sa kontrolerom koji ne vrši prioritizovanje saobraćaja već samo vrši usmeravanje. Simulirani su sledeći testni slučajevi:

- T1. Merenje kašnjenja izvršavanja AGC komandi sa konstantnim pozadinskim opterećenjem mreže;
- T2. Analiza TCP saobraćaja prilikom izvršavanja AGC aplikacije uz konstantno opterećenje mreže;
- T3. Merenje trajanja izvršavanja VVO komandi sa konstantnim pozadinskim opterećenjem mreže;
- T4. Merenje uticaja varijabilnog opterećenja mreže na OT aplikacije pametne mreže;
- T5. Merenje uticaja konstantnog opterećenja mreže na OT aplikacije pametne mreže;
- T6. Disagregacija potrošačkih profila korišćenjem dinamičke prioritizacije; Merenje maksimalne frekvencije agregacije AMI podataka je bazirano na osnovu dostupnog propusnog opsega korišćenjem dinamičke prioritizacije da bi se obezbedili podaci za disagregaciju podataka. Promena agregacionog perioda na 15s je primenjena samo na autonomne sisteme AS11 i AS12.



Slika 17: Mapa gradova od interesa i primer komunikacione topologije¹

¹ Mapa je preuzeta sa Google Maps servisa i proširena mrežnom topologijom i legendom.



Slika 18: Testna topologija mreže

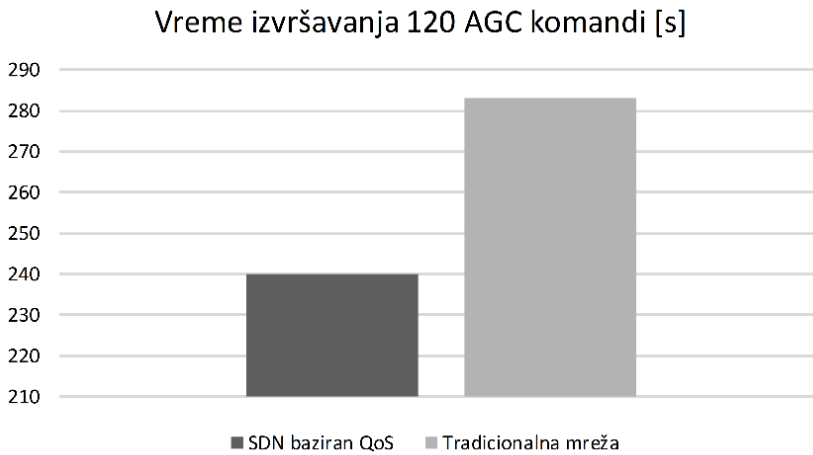
T1. Izvršavanje AGC aplikacije tokom maksimalnog opterećenja

Kao što je već navedeno, AGC podrazumeva periodično slanje komandi generatorima i praćenje stanja elektroenergetskog sistema. Uobičajen period za prikupljanje podataka i period donošenja odluke su dve ili četiri sekunde [44] što znači da je obezbeđivanje odgovarajućih komunikacionih performansi ključno za uspešno izvršavanje AGC-a.

Ovaj testni slučaj predstavlja simulaciju AGC-a izvršenu nad više povezanih oblasti slanjem 120 uzastopnih komandi na svake 2 sekunde. Estimirano je da izvršavanje komande na uređaju traje 1.8s (vreme koje je potrebno samom uređaju da fizički izvrši komandu). Test je izvršen nad tradicionalnom mrežom i SDN baziranim QoS tokom maksimalnog pozadinskog opterećenja.

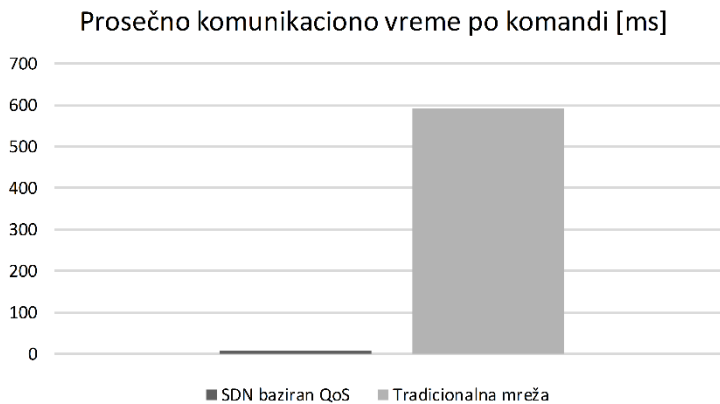
Da bi se testni slučaj uspešno izveo, potrebno je izvršiti 120 komandi za 240 sekundi. Uspešno izvršavanje komande podrazumeva da se za slanje komande i primanje odgovora ne potroši više od 200ms, kako bi se ispoštovala komandna frekvencija od 2 sekunde i omogućio brz i efikasan odgovor elektroenergetskom sistemu.

Slika 19 poredi vreme trajanja potrebno da se izvrši 120 AGC komandi kada se koristi SDN baziran QoS i tradicionalna mreža uz maksimalno pozadinsko opterećenje. Kada se koristi SDN baziran QoS, svih 120 komandi se izvrši uz traženi period od 2 sekunde, u ukupnom trajanju od 240 sekundi. U slučaju korišćenja tradicionalne mreže, pod istim uslovima, probijaju se traženi vremenski rokovi. Potrebno je 43 sekunde više (ukupno 283 sekundi) da se izvrši svih 120 komandi. Uvedeno je kašnjenje od 258ms po komandi, što dodatno usložnjava upravljanje sistemom jer se kašnjenja akumuliraju. Ako uzmemo u obzir da kašnjenje može da varira u različitim delovima mreže (npr. mreže različitih autonomnih sistema su pod različitim opterećenjem), komande mogu u različito vreme stizati do generatora.



Slika 19: Vreme izvršavanja 120 AGC komandi

Slika 20 predstavlja prosečno vreme utrošeno na komunikaciju po komandi. Pod ovim se podrazumeva vreme potrebno da se pošalje poruka i primi odgovor da je komanda uspešno izvršena, bez vremena potrebnog za izvršavanje komande na uređaju. Može se videti da je razlika značajna – prosečno komunikaciono vreme kad se koristi SDN bazirani QoS je 7.8ms, dok je kod tradicionalne mreže 591.8ms. Radi se o 75.86 puta dužem komunikacionom vremenu.



Slika 20: Prosečno komunikaciono vreme po komandi

Ako generatori primaju neažurne komande, sistem nikada neće dostići optimalno stanje jer one ne odgovaraju stanju sistema za koje su izračunate i poslate. Ukoliko se AGC uspešno ne izvrši, može doći do ispada elektroenergetskog sistema.

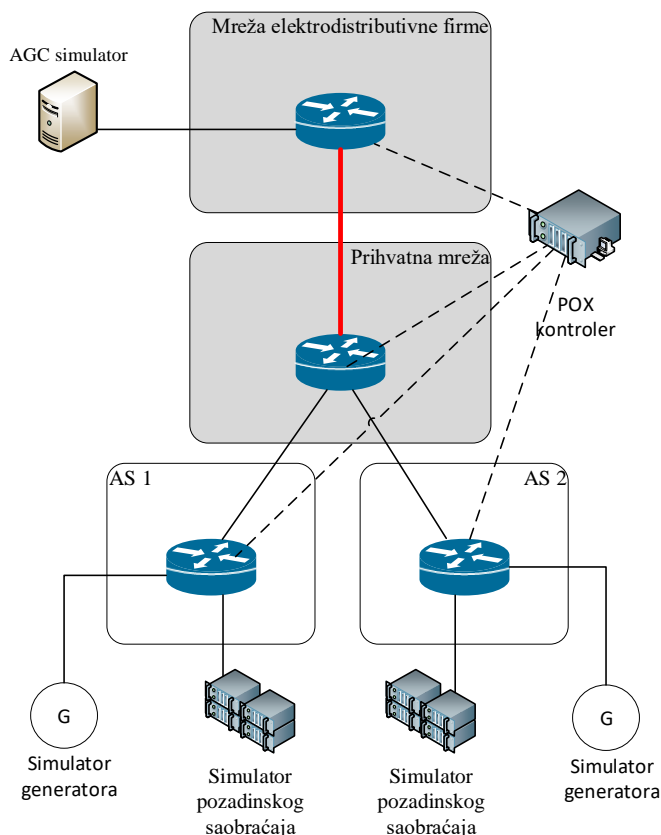
T2. Analiza TCP saobraćaja prilikom izvršavanja AGC aplikacije uz konstantno opterećenje mreže

Urađena je dodatna analiza AGC saobraćaja na TCP sloju prilikom opterećenja mreže pozadinskim saobraćajem. Analiza je urađena sa aspekta ukupno poslanih segmenata, duplih potvrda prijema, višestrukog slanja i gubljenja segmenata. Takođe je obuhvatila veličinu prozora zagušenja. Veličina prozora zagušenja je analizirana za sledeće algoritme za izbegavanje zagušenja: Cubic [68], Westwood [91], Veno [92] i Scalable [93].

Izvršeno je 160 komandi na pojednostavljenoj mrežnoj mini-topologiji koju pokazuje slika 21. Mreža je maksimalno opterećena 20 sekundi od pokretanja emulacije i izvršena su dva testna merenja sa različitom propusnošću mreže elektrodistributivnog preduzeća:

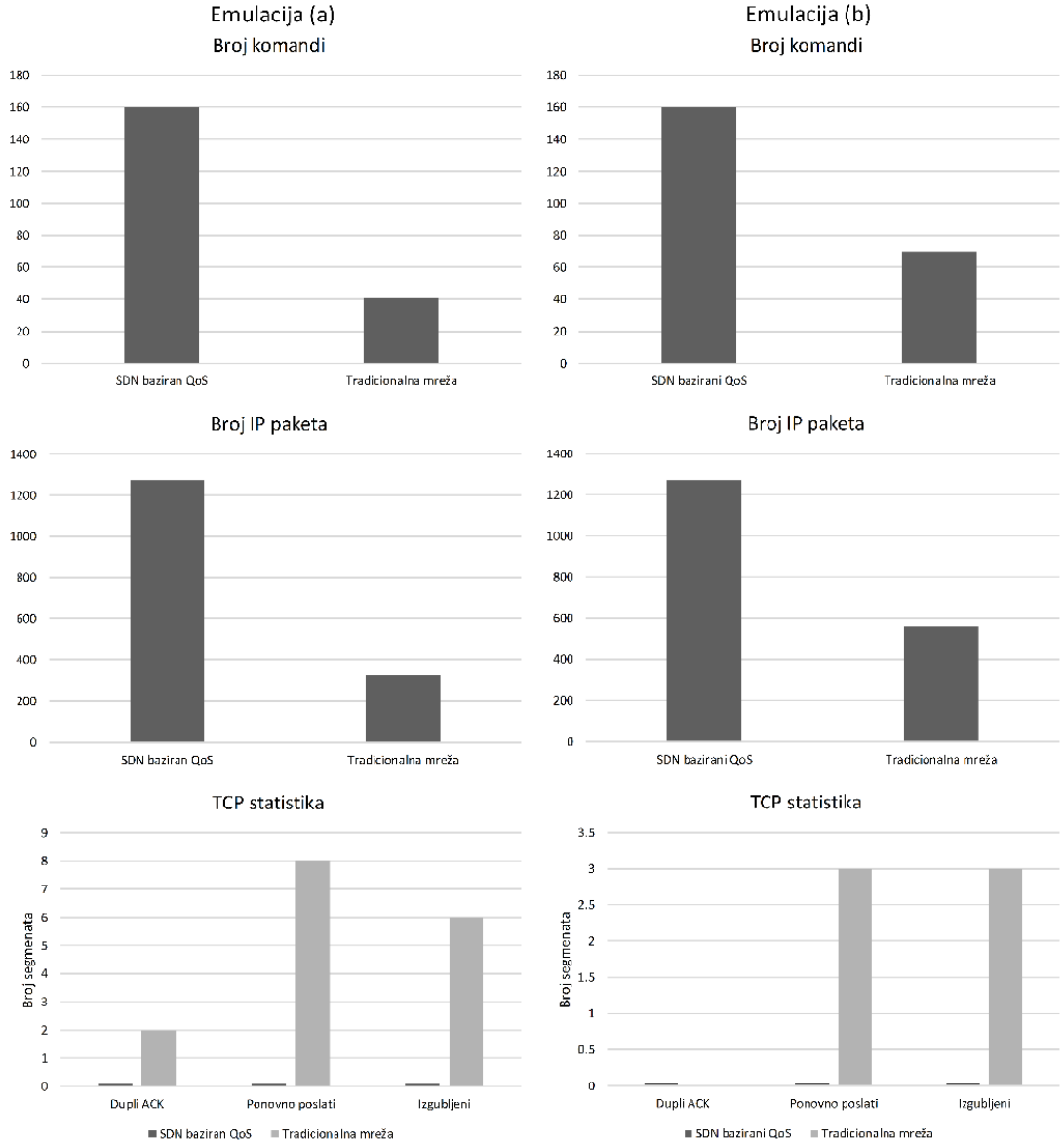
- (a) 2 Mbps
- (b) 5 Mbps

U oba slučaja je propusnost veze prihvatne mreže bila 50Mbps.



Slika 21: Mini-topologija komunikacione mreže

Slika 22 predstavlja rezultate merenja za emulacije (a) i (b). Može se videti da u prvom slučaju ne uspeva da se izvrši svih 160 komandi kada se koristi tradicionalna mreža (već samo 41 komanda), dok kada se koristi SDN baziran QoS ne dolazi do ovog problema. Takođe se vidi da je broj paketa koji se pošalje kroz mrežu, u slučaju kada se koristi SDN baziran QoS, 1276, dok je u drugom slučaju 328, što je 74% više.



Slika 22: Rezultati merenja broja komandi i TCP statistike

Radi dodatnog poređenja, 19.2% paketa pozadinskog saobraćaja (od ukupnog broja paketa koji je 82812) su dupli ACK, ponovo poslani ili izgubljeni. Privilegovani AGC saobraćaj nije pod uticajem pozadinskog saobraćaja i nema duplih ACK, izgubljenih ili ponovo poslanih paketa kada se koristi SDN baziran QoS. U slučaju tradicionalne mreže ovaj broj je 2, 8 i 6, respektabilno. Prosečno komunikaciono vreme za slanje je 5.6ms kod SDN baziranog QoS, a 5.94 sekundi kada se koristi tradicionalna mreža. Razlika je preko 1000 puta. Rezultate testnog slučaja (b) prikazuje slika 22 (b). Razlika između SDN baziranog QoS i tradicionalne mreže se takođe može videti: Broj komandi koji je uspešno izvršen je 2.22 (160:70) puta veći u prvom slučaju. Slična je situacija po pitanju poslanih TCP paketa: 1276:562. Broj ponovo poslanih i izgubljenih paketa je 3 kada se koristi tradicionalna mreža, dok je u slučaju SDN baziranog QoS taj broj 0. Komunikaciono vreme kada se koristi SDN baziran QoS je 5.5ms, dok je 2.68 sekundi u slučaju tradicionalne mreže.

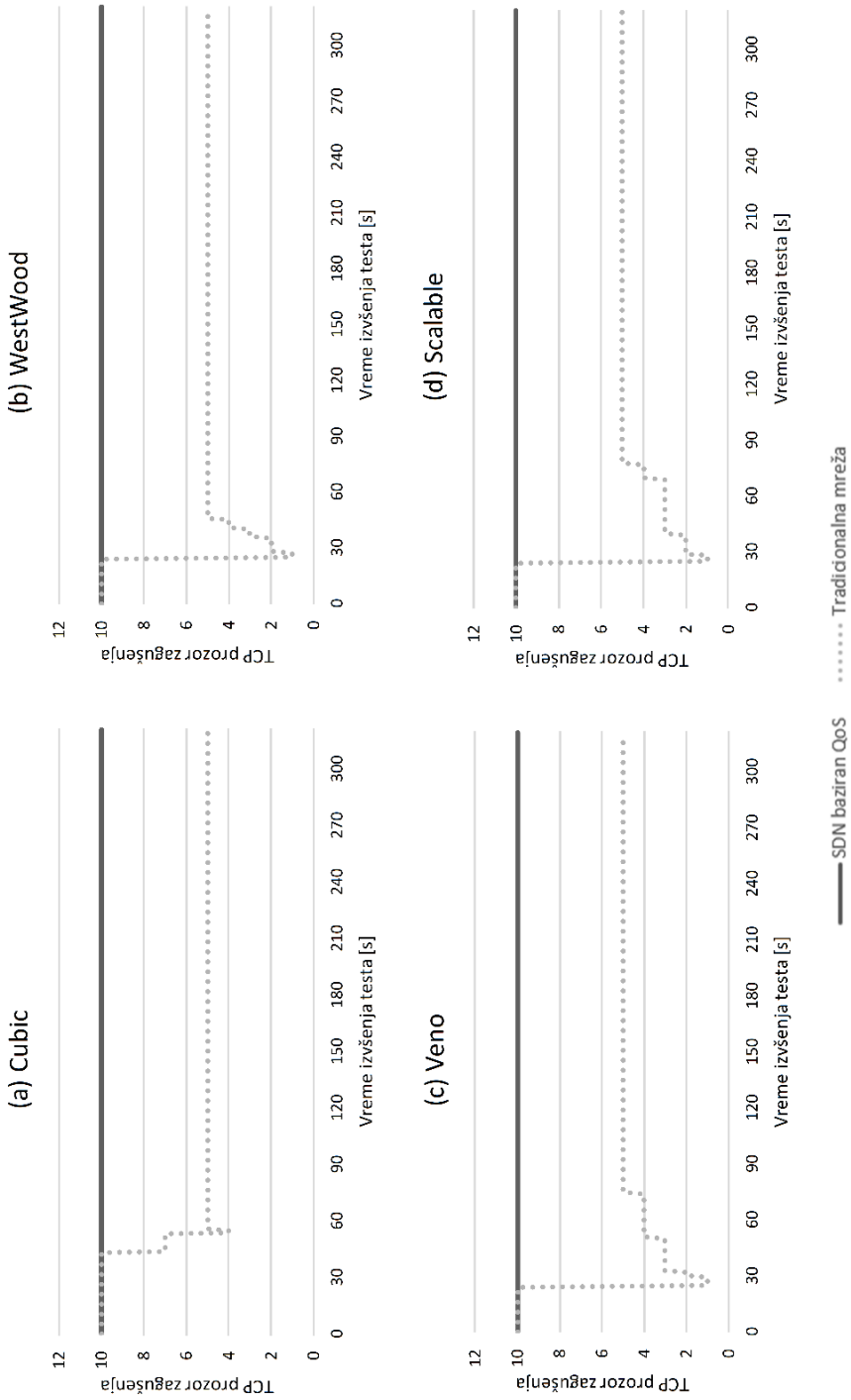
Testni slučaj pokazuje da priloženo rešenje može obezbediti odgovarajuće komunikacione zahteve za AGC bez obzira na intenzitet pozadinskog komunikacionog saobraćaja. Iz prikazanih rezultata se može videti da SDN baziran QoS pruža značajno bolje rezultate u odnosu na tradicionalnu mrežu i da omogućava izvršavanje ove kritične aplikacije kada to tradicionalna mreža nije u stanju.

Rezultati koje prikazuje slika 22 sumira tabela 4. Kako su rezultati isti za mrežu od 2 i 5Mbps kada se koristi SDN baziran QoS, iskorišćena je samo jedna kolona radi bolje preglednosti.

Tabela 4: Rezultati merenja

	SDN bazirani QoS	Tradicionalna mreža	
	2Mbps i 5Mbps	2Mbps	5Mbps
Broj izvršenih komandi	160	40	70
Isporučeni IP paketi	1276	328	562
Dupli ACK paketi	0	2	0
Ponovo poslani paketi	0	8	3
Izgubljeni paketi	0	6	3

Poređenje veličine prozora zagušenja ilustruje slika 23. Može se videti da u svim priloženim algoritmima dolazi do pada veličine prozora kada se koristi tradicionalna mreža i da se ona stabilise na vrednost 5. Kod SDN baziranog QoS nema pada veličine prozora. Kako se radi o malim količinama podataka, veličina prozora ne stigne da poraste. Da se radi o većoj količini podataka, efekat bi bio još uočljiviji.



Slika 23: Poređenje veličine prozora zagušenja

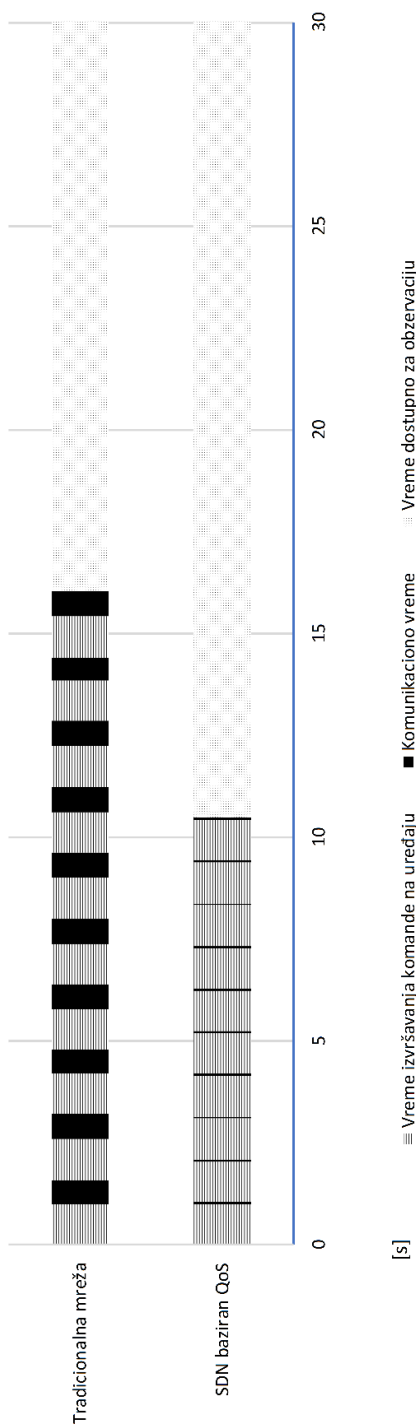
T3. Izvršavanje Vol/Var optimizacije tokom maksimalnog komunikacionog opterećenja

Ovaj testni scenario prikazuje simulaciju izvršavanja VVO OT aplikacije. Može se nazvati i jednom od kritičnih SG aplikacija jer bilo kakav otkaz u njenom radu može da dovede do redukcije potrošača (i tako izazove planirani ispad uz ostavljanje određenog broja potrošača bez struje). Ako redukcija potrošača nije dostupna, može se desiti neplanirani ispad ili u ekstremnim slučajevima može dovesti do potpunog ispada sistema. SCADA pruža podatke sa polja VVO aplikaciji koja ih koristi da bi na osnovu proračuna, preko SCADA sistema, izvršila sekvencu prekidačkih komandi (*switching sequence*) koju je potrebno izvršiti na terenu. Sekvenca prekidačkih komandi se sastoji od komandi koje je potrebno izvršiti na jednoj transformatorskoj oblasti, nakon čega se posmatra efekat komande dok kontrolni period ne prođe. Zatim se, u zavisnosti od potrebe, nastavlja sa novom prekidačkom sekvencom.

Frekvencija komandovanja varira od 1 do 15 minuta [94] i tokom tog perioda transformatorska oblast prima seriju uzastopnih prekidačkih komandi. U ovom testu se simulira VVO nad celom mrežom. Kontrolna frekvencija je skalirana na 30 sekundi i izvršava se prekidačka sekvenca od deset komandi po autonomnom sistemu. Izvršavanje komande traje jednu sekundu (npr. vremenski interval od kada mehanički aktuator primi komandu do trenutka kada javlja da je komanda izvršena traje jednu sekundu). Mreža je konstantno opterećena pozadinskim saobraćajem koliko je moguće.

Nakon izvršavanja sekvence prekidačke komande vrši se posmatranje sistema i važno je da ovaj period bude što duži. Vreme potrošeno na komunikaciju (slanje zahteva za komandovanje i primanje odgovora) moguće je smanjiti tako što će se kašnjenje paketa minimizovati i obezbediti odgovarajući propusni opseg. Vreme izvršavanja komandi je fiksno i ono se ne može smanjiti.

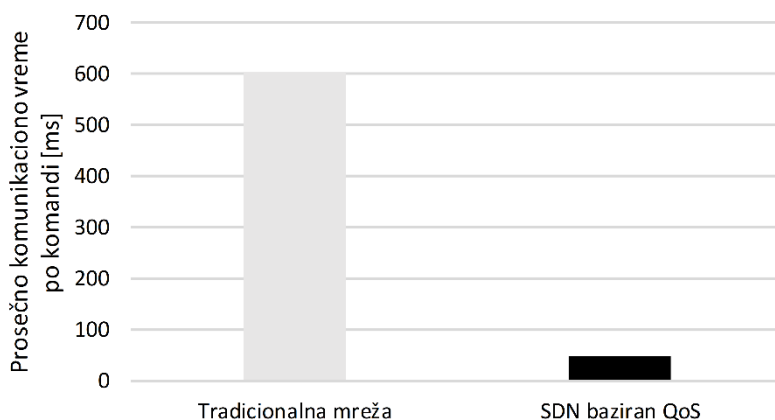
Slika 24 ilustruje poređenje jedne VVO prekidačke sekvence pod maksimalnim pozadinskim komunikacionim opterećenjem kad se koristi tradicionalna mreža i SDN baziran QoS. Rezultati su prikazani za jednu transformatorsku oblast koja se nalazi u autonomnom sistemu AS1 (druge oblasti imaju slične rezultate i zbog toga nisu prikazane). Vreme koje je dostupno za praćenje sistema kada se koristi SDN bazirano QoS rešenje je 20.5s, dok je kod tradicionalne mreže dostupno 14.9s. SDN baziran QoS omogućuje 25% više vremena za praćenje sistema. Takođe, vidi se kako se kašnjenje svake komande akumulira.



Slika 24: VVO testni rezultati

Slika 25 pokazuje prosečno vreme trajanja komunikacije po komandi. Ovo podrazumeva koliko vremena treba da se komanda pošalje kao i da se primi odgovor, bez trajanja same komande na uređaju. Komunikaciono vreme kod tradicionalne mreže je 603.43ms, a kad se koristi SDN bazirani QoS je 47.92ms. Korišćenje SDN baziranog QoS pristupa je 12.58 puta brže od tradicionalnog pristupa.

Šteta može biti ogromna u slučaju da se VVO ne izvrši uspešno. Važno je naglasiti da je moguće smanjiti frekvenciju prekidačke sekvence dokle god komunikaciona mreža može da obezbedi funkcionisanje u idealnim uslovima.



Slika 25: Prosečno komunikaciono vreme po komandi [ms]

T4. Uticaj varijabilnog opterećenja na akviziciju podataka

Ovaj testni slučaj pokazuje uticaj pozadinskog saobraćaja na SCADA, PMU i AMI saobraćaj. Pozadinski saobraćaj ima vršno opterećenje 10 puta veće od ivične mreže.

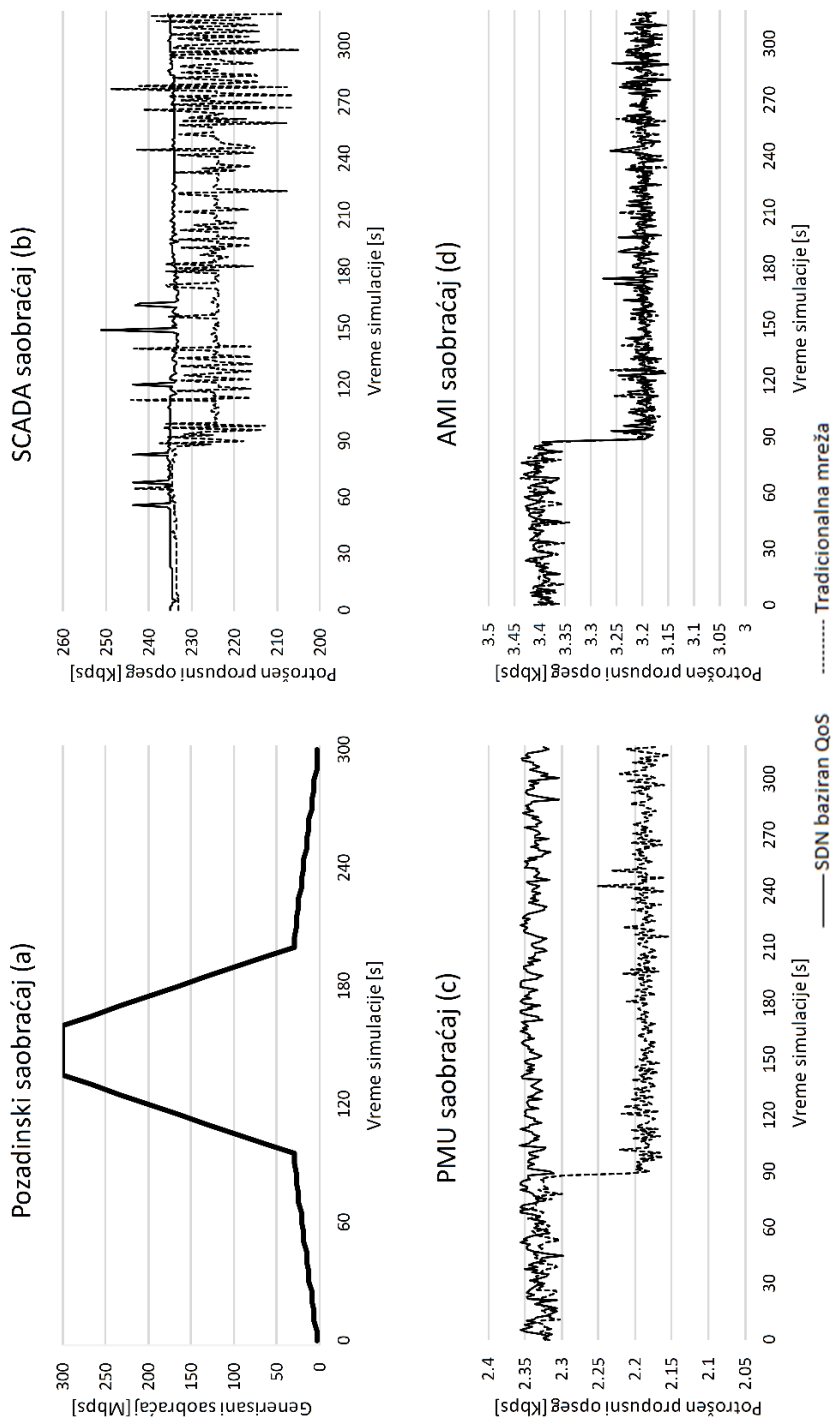
Povećanje u pozadinskom saobraćaju preko maksimalnog dozvoljenog propusnog opsega ne sme da utiče na garantovani QoS za privilegovani SCADA i PMU saobraćaj.

Saobraćaj je generisan kao što prikazuje slika 26 (a). Opterećenje raste prvih 90s, dok ne dostigne 30Mbps. Nakon toga 25 sekundi se forsira maksimalno opterećenje od 300Mbps. Na kraju opterećenje pada do 3% dostupnog opsega.

SCADA potrošnju propusnog opsega prikazuje slika 26 (b). Skalirana je da bi se pružio bolji uvid u uticaj opterećenja ako je QoS primenjen. Isprekidana linija predstavlja saobraćaj kada se koristi tradicionalna mreža, a puna kada se koristi SDN bazirani QoS. Kod tradicionalne, IP-bazirane mreže, jednom kada dođe do saturacije veze usled pozadinskog saobraćaja,

SCADA saobraćaj opada, dok se kod SDN baziranog QoS ovo ne dešava. Slika 26 (c) i slika 26 (d) pokazuju PMU i AMI saobraćaj. Može se videti da propusni opseg AMI saobraćaja nije sačuvan jer nije tretiran kao privilegovani saobraćaj, dok PMU saobraćaja jeste. Ovakav pad u propusnom opsegu će značajno povećati kašnjenje poruka kroz komunikacionu mrežu.

Ovaj test pokazuje da prilikom maksimalnog opterećenja, tradicionalan pristup rezultuje u padu od 5 do 7%, dok korišćenje SDN pristupa ne pokazuje pad u propusnosti za privilegovani saobraćaj. Vršno opterećenje se može desiti kada se izvršavaju kratkoročne operacije koje imaju velike zahteve za propusnim opsegom. Na primer, pravljenje sigurnosnih kopija kroz mrežu koje traju nekoliko sekundi, slanje podataka sa servisa klijentskim aplikacijama (*integrity update*) usled uspostave veze itd. U tim slučajevima informacija potrebna za kritične akcije može stići prekasno ako se garantovana propusnost ne ispoštuje.



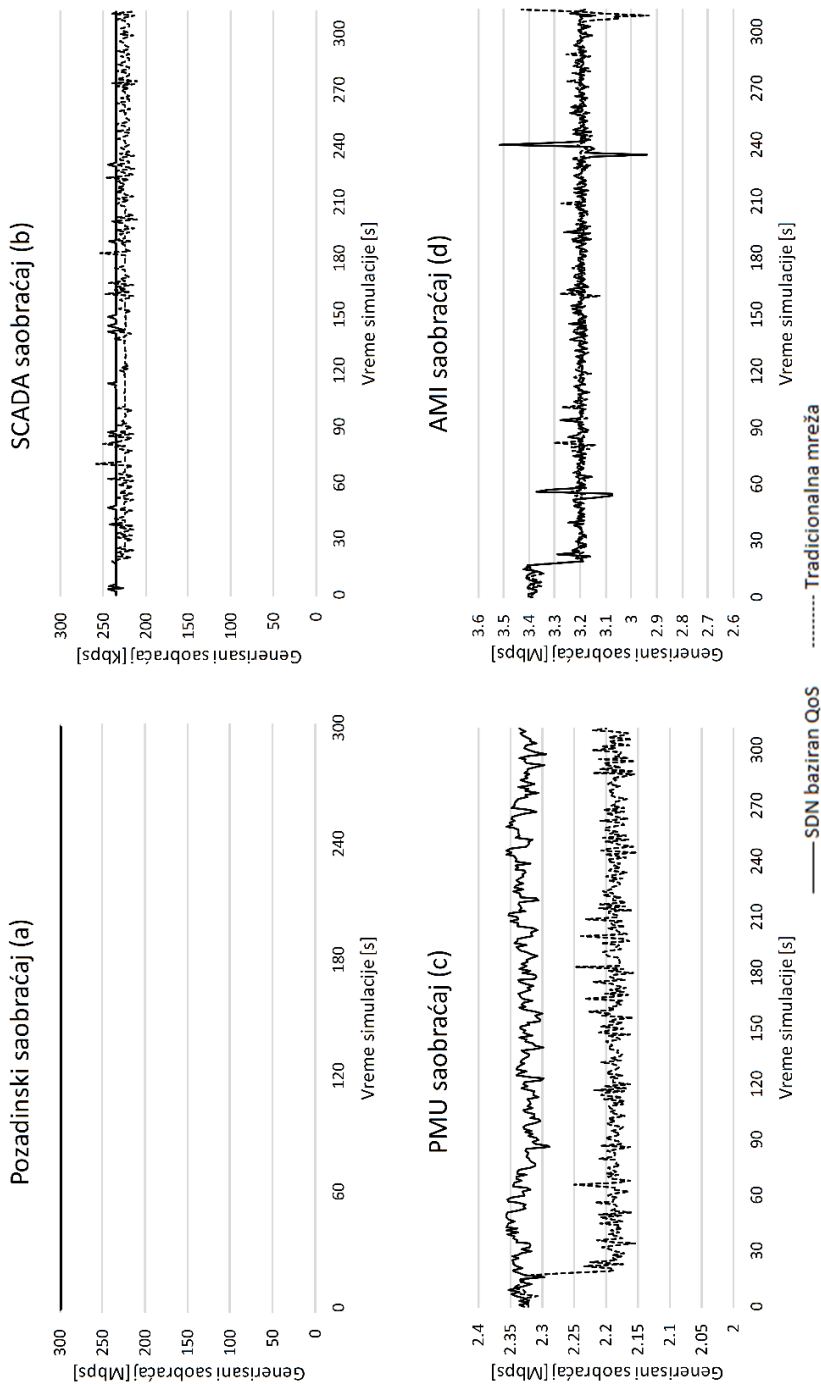
Slika 26: Rezultati merenja uticaja varijabilnog opterećenja na akviziciju podataka

T5. Uticaj konstantnog opterećenja na akviziciju podataka

Ovaj test pokazuje uticaj iznenadnog i konstantnog visokog opterećenja od strane pozadinskog saobraćaja na privilegovani saobraćaj. Ova situacija se može desiti tokom održavanja informacionog sistema (npr. pravljenje periodičnih kopija velike količine podataka kroz mrežu), određenih administrativnih akcija (npr. obračunavanje plata, instalacija programskih paketa itd) ili jednostavno usled intenzivnijeg saobraćaja drugih korisnika (npr. IPTV, Youtube itd).

Privilegovani saobraćaj ne sme biti pod uticajem pozadinskog saobraćaja kako bi se osigurao garantovani QoS za privilegovane SG aplikacije.

Rezultate pokazuje slika 27. Pozadinski saobraćaj je generisan kao što prikazuje slika 27 (a). Slika 27 (b) prikazuje poređenje SCADA saobraćaja kada se koristi tradicionalna mreža i SDN baziran QoS. Jasno se vidi da SCADA saobraćaj kod SDN baziranog QoS nema pat u protoku podataka koji postoji kod tradicionalne mreže. PMU potrošnju propusnog opsega prikazuje Slika 27 (c) dok AMI saobraćaj prikazuje slika 27 (d). Može se videti da je AMI saobraćaj redukovao za 5% a PMU za 6%. Programski svič koji je korišćen, Open VSwitch, ne smanjuje tok podataka na nulu. Ovaj test pokazuje da kada se koristi SDN, propusni opseg se može iskoristiti pod maksimalnim opterećenjem stalno, bez ugrožavanja kritičnih aplikacija.



Slika 27: Rezultati merenja uticaja konstantnog opterećenja na akviziciju podataka

T6. Disagregacija potrošačkih profila

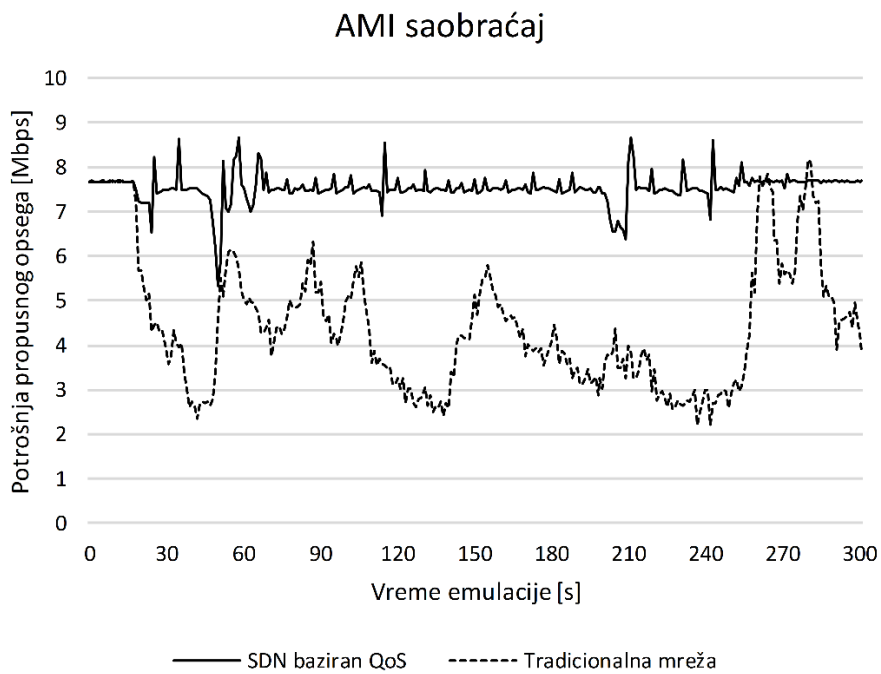
Test ilustruje kako je disagregaciju potrošačkih profila moguće uraditi korišćenjem dinamičke prioritetizacije. Perioda uzorkovanja je smanjena sa 5 minuta na 15 sekundi za oblasti koje pripadaju autonomnim sistemima AS11 i AS12. AMI prioritet saobraćaja je podignut iznad pozadinskog opterećenja. Pretpostavljeno je da će povećanje tempa uzorkovanja linearno povećati zahtev za propusnim opsegom.

Kod disagregacije podataka potrebno je da se podaci prime što je ranije moguće. Povećavanje prioriteta AMI saobraćaja bi trebalo da uspe dokle god ima dovoljno resursa.

Primenjivan je stalan pritisak opterećenjem mreže i ciljani QoS je postignut. Slika 28 prikazuje poređenje AMI saobraćaja sa predloženim rešenjem i bez njega. Kada je korišćen SDN baziran QoS, AMI saobraćaj je očuvan i ne fluktuirao kao kod tradicionalne mreže.

Moguće je podizati nivo uzorkovanja dokle god ima dostupnog propusnog opsega za sav privilegovani saobraćaj i dokle god se taj mrežni saobraćaj može tretirati kao odvojeni tok, što će dovesti do unapređenja mrežnih performansi.

Može se primetiti da kod tradicionalne mreže saobraćaj varira. Ovo je posledica algoritma za izbegavanje zagušenja što je potvrđeno testovima. Ovo ponašanje je detaljno obrađeno u [95]. Podrazumevani algoritam za izbegavanje zagušenja je podrazumevani Ubuntu, Cubic [68]. Kada se koristi SDN bazirani QoS, ovo se ne dešava zato što ne dolazi do zagušenja za privilegovane tokove podataka.



Slika 28: AMI potrošnja propusnog opsega

8. Zaključak

Disertacija opisuje rešenje za upravljanje komunikacionom infrastrukturom pametne elektroenergetske mreže u cilju obezbeđivanja QoS. Upravljanje komunikacionom mrežom za pametne mreže dodatno usložnjava njena dinamička priroda koja se prenosi na komunikacionu mrežu, a to su – dinamički zahtevi za propusnim opsegom i kašnjenjem paketa kao i dinamički prioriteti mrežnog saobraćaja OT aplikacija uz promenljiv broj OT aplikacija. Objašnjeno je zbog čega komunikaciona infrastruktura za pametne mreže mora da bude efikasna, proširiva i jednostavna za upravljanje. Predstavljene su mogući pristupi rešavanju QoS problema: (a) (pre)dimenzionisanje računarske mreže maksimalno potrebnim kapacitetom, (b) optimizacija količine podataka koja se šalje kroz mrežu na aplikativnom sloju i (c) obezbeđivanje QoS na infrastrukturnom sloju, odnosno na nivou mrežne opreme. Nedostatak prvog pristupa jeste to što je neophodno investirati u opremu unapred onda kada bude niži stepen iskorišćenja, a kada se dostigne maksimalno opterećenje – dolazi se opet do suštinskog problema da saobraćaj nižeg prioriteta utiče na saobraćaj višeg prioriteta. Drugi pristup može odložiti problem, ali ga suštinski ne rešava zbog trenda rasta zahteva za propusnim opsegom. Treći pristup je obrađen u ovoj disertaciji korišćenjem programski definisanih mreža. Omogućeno je upravljanje komunikacionom mrežom od strane OT aplikacija na osnovu stanja pametne mreže kako bi se dostigao globalni optimum ovog kritičnog infrastrukturnog sistema.

Razvijena je evaluaciona platforma za SG komunikacionu infrastrukturu zasnovana na Mininet platformi, koja omogućuje modelovanje SG komunikacione mreže sa tokovima podataka, automatizovano podešavanje emulacionog okruženja, pokretanje emulacije, prikupljanje i obradu rezultata. Zatim je razvijen mrežni kontroler SGSDNC koji omogućava dinamički QoS i ujedno zadovoljava zahteve navedene u uvodu [10]:

- Čvrsta garancija QoS preko cele komunikacione mreže – pokriveno dinamičkim prioritetima i podesivim QoS;
- Dugačak životni vek i predviđena za proširenje namene u budućnosti – kako je rešenje bazirano na IP SDN mrežama, garantuje se da će imati dugačak vek;

- Izuzetno nisko kašnjenje što predstavlja zahteve određenih OT aplikacija – dokle god propusni opseg može da zadovolji potrebe prioritetnog saobraćaja, moguće je garantovati minimalno kašnjenje koje mreža može da podrži;
- Visoka propusnost – kako se prioritetan i neprioritetan saobraćaj tretiraju odvojeno, moguće je neprioritetan saobraćaj slati maksimalnom brzinom, a podaci će biti isporučeni onda kada je to moguće. Ovo omogućava do 100% iskorišćenosti propusnog opsega u mnogim slučajevima, od kojih su neki i ilustrovani u testnim slučajevima, dok se potpuno poštuje traženi QoS.

Postizanje minimalnog kašnjenja omogućava postizanje vremenske poravnatosti podataka.

Pokazano je da predloženo rešenje rešava zadati problem putem šest testnih slučajeva u uslovima rada OT aplikacija u toku mrežnog zagušenja: izvršavanje AGC OT aplikacije sa aspekta izvršenja komandi i analize TCP saobraćaja, izvršavanje VVO OT aplikacije, akvizicija podataka sa vršnim i konstantnim opterećenjem i na kraju disagregacija potrošačkih profila uzorkovanjem merenja na pametnim brojlama. U svim slučajevima je pokazano da predloženo rešenje uspeva da isporuči dogovoreni QoS, kada tradicionalna mreža ne uspeva. Na vreme se izvršavaju sve AGC komande. Komunikaciono vreme je preko 75 puta kraće kada se koristi priloženo rešenje. Vreme koje je dostupno za nadgledanje sistema prilikom VVO izvršavanja je 25% veće u slučaju priloženog rešenja. SCADA i PMU saobraćaj prilikom zagušenja mreže imaju 5–7% pad u propusnom opsegu kad se koristi tradicionalna mreža, što se ne dešava u slučaju kada se koristi opisano rešenje pa samim tim ne dolazi do kašnjenja podataka. Posledice neuspešnog izvršavanja AGC ili VVO aplikacije mogu da budu katastrofalne po elektroenergetski sistem – od ispada do potpunog otkaza sistema.

Dakle, dokle god je mrežni kapacitet dovoljan za prioritetan saobraćaj, pozadinski saobraćaj neće uticati na njega a preostali kapacitet će moći da se iskoristi maksimalno.

Razvijeno okruženje se može koristiti za reprodukciju rezultata, jednostavno vršenje novih emulacija kao i razvijanje novih strategija za rukovanje SG komunikacionom mrežom. Pojedini delovi mreže mogu biti apstrahovani kao mikromreže ili grupe mikromreža, omogućava proširenje istraživanja i u tom polju. Kako problem obrađen u ovom doktoratu postoji i u drugim infrastrukturnim sistemima, kao što su sistemi za rukovanje gasom, saobraćajem, vodovodom, zdravstvom i generalno pametnim gradovima, – rešenje se može iskoristiti i u tim domenima jer je dovoljno generičko.

U nastavku istraživanja planirano je:

- Proširenje modela i platforme za emulaciju da se podrže različiti generatori saobraćaja kao što su DNP3 i C37.118, za šta već postoje dostupne biblioteke otvorenog koda [85] i [96], respektabilno;
- Razmatranje korišćenja drugih protokola transportnog nivoa kao što je UDP ali i namenskih rešenja;
- Razvijanje algoritama za upravljanje mrežom tako što će se koristiti višestruke putanje (*multipathing*);
- Uključivanje komercijalnog DMS rešenja kako bi se problemi sa komunikacionom mrežom mogli probati sa konkretnim aplikacijama;
- Izvršiti procenu korisnosti uvođenja SDN opreme u postojeću komunikacionu infrastrukturu – potpuno uvođenje programabilne opreme spram delimične zamene opreme;
- Prepoznavanje i rukovanje invazivnim saobraćajem koji guši ostali saobraćaj.

Literatura

- [1] J. Spiess, Y. T. Joens, R. Dragnea, and P. Spencer, "Communication network architecture and design principles for smart grids," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 18, no. 4, pp. 3–17, 2014, doi: 10.1002/bltj.
- [2] N. R. Babu, *Smart Grid Systems: Modeling and Control*, 1st ed. Oakville, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2018.
- [3] O. Mohammed, T. Youssef, M. H. Cintuglu, and A. Elsayed, *Smart Energy Grid Engineering*, 1st ed. Academic Press, 2016.
- [4] D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, and R. Balme, Eds., *Smart Grid Applications and Developments*, 1st ed. London: Springer-Verlag London, 2014.
- [5] F. N. Claessen, *Smart grid control; An analysis of control systems within a Dutch residential microgrid incorporating decentralised renewable energy resources*. Utrecht: University of Utrecht, 2012.
- [6] S. K. S. Salman, *Introduction to the Smart Grid concept*, 1st ed. The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [7] GTM Research, "Trends in Utility Smart Grid Communications Management," 2013.
- [8] W. Wang, Y. Xu, and M. Khanna, "A survey on the communication architectures in smart grid," *Comput. Networks*, vol. 55, no. 15, pp. 3604–3629, 2011, doi: 10.1016/j.comnet.2011.07.010.
- [9] U.S. Department of Energy, "Communications Requirements of Smart Grid Technologies," *Available online at <http://energy.gov>*, pp. 1–69, 2010, [Online]. Available: <http://energy.gov/gc/downloads/communications-requirements-smart-grid-technologies>.
- [10] D. E. Bakken, A. Bose, C. H. Hauser, D. E. Whitehead, and G. C. Zweigle, "Smart generation and transmission with coherent, real-time data," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 928–951, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2116110.
- [11] R. Kappagantu and S. A. Daniel, "Challenges and issues of smart grid implementation: A case of Indian scenario," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 453–467,

- 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2018.01.002.
- [12] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak, and C. F. Covrig, "A survey on the critical issues in smart grid technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 396–405, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.036.
- [13] A. Bari, J. Jiang, W. Saad, and A. Jaekel, "Challenges in the smart grid applications: An overview," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/974682.
- [14] Eurelectric, "Regulation for Smart Grids Eurelectric." Eurelectric, Brussels, p. 40, 2011.
- [15] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang, and C. L. P. Chen, "A survey of communication/networking in Smart Grids," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 391–404, 2012, doi: 10.1016/j.future.2011.04.014.
- [16] X. Lu, W. Wang, and J. Ma, "An empirical study of communication infrastructures towards the smart grid: Design, implementation, and evaluation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 170–183, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2225453.
- [17] Z. Jianchao, S. Boon-Chong, L. Tek-Tjing, and F. Chuan Heng, "Opportunities for software-defined networking in smart grid," *ICICS 2013 - Conf. Guid. 9th Int. Conf. Information, Commun. Signal Process.*, 2013, doi: 10.1109/ICICS.2013.6782793.
- [18] M. Stötzel, M. Zdrallek, and F. Schwermer, "Quality of service guarantee in smart grid infrastructure communication using traffic classification," *22 nd Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 0480, pp. 10–13, 2013.
- [19] O. Al-khatib, S. Member, W. Hardjawana, and B. Vucetic, "Traffic Modeling and Optimization in Public and Private Wireless Access Networks for Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1949–1960, 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2304495.
- [20] A. Bernstein, D. Bienstock, D. Hay, M. Uzunoglu, and G. Zussman, "Power grid vulnerability to geographically correlated failures - Analysis and control implications," in *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2014, pp. 2634–2642, doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848211.
- [21] M. Cokic and I. Seskar, "Software defined network management for dynamic smart GRID traffic," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 96, pp. 270–282, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.022>.
- [22] M. Cokic and I. Seskar, "Analysis of TCP Traffic in Smart Grid Using SDN Based QoS," in *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Nov. 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/TELFOR.2018.8611800.

- [23] M. Tahir, S. K. Mazumder, and S. Member, "Dynamic-Priority based Event-Driven Communication in Smart Grid," pp. 1–8, 2014.
- [24] Y. Wang, P. Yemula, and A. Bose, "Decentralized communication and control systems for power system operation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 885–893, 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2363192.
- [25] A. Goodney, S. Kumar, A. Ravi, and Y. H. Cho, "Efficient PMU networking with software defined networks," *2013 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2013*, pp. 378–383, 2013, doi: 10.1109/SmartGridComm.2013.6687987.
- [26] A. Sydney, J. Nutaro, C. Scoglio, D. Gruenbacher, and N. Schulz, "Simulative comparison of multiprotocol label switching and OpenFlow network technologies for transmission operations," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 763–770, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2227516.
- [27] A. Patil, M. Z. Yunus, S. Daheeval, V. Sharma, and C. Dickey, "Openflow with MPLS in Smart Grids," *Univ. Color. Boulder*, pp. 1–27, 2014.
- [28] C. H. Uiuc *et al.*, "Achieving High Utilization with Software-Driven WAN," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 43, no. 4, pp. 15–26, 2013, doi: 978-1-4503-2056-6/13/08.
- [29] X. Zhang, K. Wei, L. Guo, W. Hou, and J. Wu, "SDN-based Resilience Solutions for Smart Grids," in *2016 1st International Conference on Software Networking, ICSN 2016*, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICSN.2016.7501931.
- [30] C. H. Lo and N. Ansari, "Decentralized controls and communications for autonomous distribution networks in smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 66–77, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2228282.
- [31] S. Al-Rubaye, E. Kadhum, Q. Ni, and A. Anpalagan, "Industrial Internet of Things Driven by SDN Platform for Smart Grid Resiliency," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, pp. 1–1, 2017, doi: 10.1109/JIOT.2017.2734903.
- [32] E. Molina, E. Jacob, J. Matias, N. Moreira, and A. Astarloa, "Using Software Defined Networking to manage and control IEC 61850-based systems," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 43, pp. 142–154, 2015, doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.10.016.
- [33] N. Dorsch, F. Kurtz, H. Georg, C. Hagerling, and C. Wietfeld, "Software-defined networking for Smart Grid communications: Applications, challenges and advantages," *2014 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 422–427, 2014, doi: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007683.
- [34] A. Aydeger, K. Akkaya, M. H. Cintuglu, A. S. Uluagac, and O. Mohammed, "Software Defined Networking for Resilient Communications in Smart Grid Active Distribution

- Networks,” 2016 *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/ICC.2016.7511049.
- [35] H. Maziku and S. Shetty, “Software Defined Networking enabled resilience for IEC 61850-based substation communication systems,” 2017 *Int. Conf. Comput. Netw. Commun. ICNC 2017*, pp. 690–694, 2017, doi: 10.1109/ICCNC.2017.7876213.
- [36] L. Ren, Y. Qin, B. Wang, P. Zhang, P. B. Luh, and R. Jin, “Enabling Resilient Microgrid through Programmable Network,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. DECEMBER 2015, pp. 1–1, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2589903.
- [37] N. Chen, M. Wang, N. Zhang, X. S. Shen, and D. Zhao, “SDN-Based Framework for the PEV Integrated Smart Grid,” *IEEE Netw.*, vol. 31, no. 2, pp. 14–21, 2017, doi: 10.1109/MNET.2017.1600212NM.
- [38] Fujitsu, “Software-Defined Networking for the Utilities and Energy Sector.” Fujitsu, pp. 1–7.
- [39] X. Dong, H. Lin, and R. Tan, “Software-Defined Networking for Smart Grid Resilience : Opportunities and Challenges [Position Paper],” pp. 61–68, 2015, doi: 10.1145/2732198.2732203.
- [40] A. Gupta *et al.*, “SDX : A Software Defined Internet Exchange,” *Proc. 2014 ACM Conf. SIGCOMM*, pp. 579–580, 2014, doi: 10.1145/2619239.2626300.
- [41] V. C. Strezoski, *Osnovi Elektroenergetike*, Unpublishe. Novi Sad.
- [42] Nist, N. S. Publication, and National Institute of Standards and Technology, “NIST Special Publication 1108 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards,” *Nist Spec. Publ.*, vol. 0, pp. 1–90, 2010, doi: 10.6028/NIST.SP.1108r3.
- [43] A. J. Kornecki and J. Zalewski, “Real Time Software Development – an Engineering Approach,” *Design*, pp. 1–16.
- [44] N. Jaleeli, “Understanding automatic generation control,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 1106–1122, 1992, doi: 10.1109/59.207324.
- [45] A. Bose, “Phasor Measurements for Blackout Prevention.” Washington State University, Huntington Beach, 2013.
- [46] R. F. Nuqui, “State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements.” Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Virginia, Blacksburg, p. 220, 2001.
- [47] J. Minkel, “The 2003 Northeast Blackout--Five Years Later,” 2008. <https://www.scientificamerican.com/article/2003-blackout-five-years-later/> (accessed Jan. 01, 2019).

- [48] National Electrical Manufacturers Association, "Volt/VAR Optimization Improves Grid Efficiency," 2012, [Online]. Available: <https://www.nema.org/Policy/Energy/Smartgrid/Documents/VoltVAR-Optimization-Improves-Grid-Efficiency.pdf>.
- [49] US Department of Energy, "Benefits Of Demand Response In Electricity Markets And Recommendations For Achieving Them," no. February, pp. 1–122, 2006.
- [50] G. W. Hart, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring," *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870–1891, 1992, doi: 10.1109/5.192069.
- [51] K. Carrie Armel, A. Gupta, G. Shrimali, and A. Albert, "Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 213–234, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.08.062.
- [52] V. C. Güngör *et al.*, "Smart grid technologies: Communication technologies and standards," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2166794.
- [53] D. J. Dolezilek, S. Schweitzer, and S. E. Laboratories, "Practical Applications of Smart Grid Technologies," *11th Annu. West. Power Deliv. Autom. Conf.*, 2009.
- [54] N. Saputro, K. Akkaya, and S. Uludag, "A survey of routing protocols for smart grid communications," *Computer Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2741–2771, 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.03.027.
- [55] W. L. W. Luan, D. Sharp, and S. Lancashire, "Smart grid communication network capacity planning for power utilities," *Transm. Distrib. Conf. Expo. 2010 IEEE PES*, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1109/TDC.2010.5484223.
- [56] D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Analysis of communication schemes for Advanced Metering Infrastructure (AMI)," *2014 IEEE PES Gen. Meet. | Conf. Expo.*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939562.
- [57] C. H. Lo and N. Ansari, "The progressive smart grid system from both power and communications aspects," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 14, no. 3, pp. 799–821, 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.072811.00089.
- [58] G. Rajalingham, Q. D. Ho, and T. Le-Ngoc, "Evaluation of an efficient Smart Grid communication system at the neighbor area level," in *2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2014*, 2014, pp. 426–431, doi: 10.1109/CCNC.2014.6866605.
- [59] W. Meng, R. Ma, and H.-H. Chen, "Smart grid neighborhood area networks: a survey," *IEEE Netw.*, vol. 28, no. 1, pp. 24–32, 2014, doi: 10.1109/MNET.2014.6724103.

- [60] R. Rashed Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, and K. Raahemifar, "A survey on Advanced Metering Infrastructure," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 473–484, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.025.
- [61] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN," *Comput. Networks*, vol. 67, pp. 74–88, 2014, doi: 10.1016/j.comnet.2014.03.029.
- [62] IEEE, *IEEE Standard for Electric Power Systems Communications – Distributed Network Protocol (DNP3)*, no. October. IEEE, 2012.
- [63] IEEE Standards Association, *C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, vol. 2011, no. December. 2011.
- [64] IEEE Standards Association, "C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems," no. December, pp. 1–53, 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111222.
- [65] Information Sciences Institute and University of Southern California, "RFC 791: Internet Protocol," 1981, [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc791>.
- [66] J. F. Kurose and K. W. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach (6th Edition)*, 6th ed. Pearson, 2012.
- [67] Information Sciences Institute and University of Southern California, "TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL," 1981. <https://tools.ietf.org/html/rfc793> (accessed Apr. 09, 2019).
- [68] S. Ha and I. Rhee, "CUBIC: A New TCP-Friendly High-Speed TCP Variant," *ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev. - Res. Dev. Linux kernel*, vol. 42, no. 5, pp. 64–74, 2008, doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1400097.1400105>.
- [69] E. B. M. Allman, V. Paxson, "TCP Congestion Control," *Network Working Group*, 2019. <https://tools.ietf.org/html/rfc5681> (accessed Apr. 09, 2019).
- [70] The Cooperative Association for Internet Data Analysis (CAIDA), "Passive Network Monitors, Chicago Monitor A, From Thursday 18:00:00 24.03.2016, to Friday 18:00:00 25.03.2016.," 2016. .
- [71] S. Jain *et al.*, "B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN," *Proc. ACM SIGCOMM 2013 Conf. SIGCOMM - SIGCOMM '13*, p. 3, 2013, doi: 10.1145/2486001.2486019.
- [72] T. Benson, A. Akella, and D. Maltz, "Unraveling the complexity of network management," in *6th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, 2009, pp. 335–348, [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1558977.1559000>.

- [73] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2015, doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
- [74] N. McKeown *et al.*, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, p. 69, 2008, doi: 10.1145/1355734.1355746.
- [75] V. Stanisis and M. Devetsikiotis, "Dynamic utility-based bandwidth allocation policies: The case of overloaded network," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 4, no. c, pp. 1958–1962, 2004, doi: 10.1109/icc.2004.1312863.
- [76] "The POX network software platform." <https://github.com/noxrepo/pox> (accessed Jan. 01, 2018).
- [77] B. Heller, *OpenFlow Switch Specification version 1.3.5*, 1st ed., vol. 1. Open Networking Foundation, 2009.
- [78] B. Lantz, B. Heller, and N. McKeown, "A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks," ... *Work. Hot Top. Networks*, pp. 1–6, 2010, doi: 10.1145/1868447.1868466.
- [79] A. Blankstein, S. Erickson, and M. Melara, "Mininet Clustering."
- [80] "Cluster Edition Prototype." <https://github.com/mininet/mininet/wiki/Cluster-Edition-Prototype> (accessed Feb. 05, 2018).
- [81] M. Gupta, J. Sommers, and P. Barford, "Fast, accurate simulation for SDN prototyping," *Proc. Second ACM SIGCOMM Work. Hot Top. Softw. Defin. Netw. - HotSDN '13*, p. 31, 2013, doi: 10.1145/2491185.2491202.
- [82] Linux Fondation, "Open vSwitch," 2016. <http://openvswitch.org> (accessed Jan. 15, 2017).
- [83] T. Pfeifferberger, J. L. Du, P. B. Arruda, and A. Anzaloni, "Reliable and flexible communications for power systems: Fault-tolerant multicast with SDN/OpenFlow," *2015 7th Int. Conf. New Technol. Mobil. Secur. - Proc. NTMS 2015 Conf. Work.*, 2015, doi: 10.1109/NTMS.2015.7266517.
- [84] V. W. Protocol, *OpenFlow Switch Specification*, 2nd ed. Open Networking Foundation, 2012.
- [85] Automatak, "OpenDNP3." <https://www.automatak.com/opendnp3/> (accessed Apr. 06, 2019).
- [86] M. Cokic and I. Seskar, "SGSDNC and SGCEP source code," 2019. https://github.com/cokicm/phd_thesis (accessed Jan. 01, 2018).

- [87] M. Ott, I. Seskar, R. Siraccusa, and M. Singh, "ORBIT testbed software architecture: Supporting experiments as a service," *Proceedings - First Int. Conf. Testbeds Res. Infrastructures Dev. Networks Communities, Tridentcom 2005*, vol. 2005, pp. 136–145, 2005, doi: 10.1109/TRIDNT.2005.27.
- [88] Schweitzer Engineering Laboratories, "Synchrophasor FAQs." 2012.
- [89] B. Karimi and V. Namboodiri, "On the capacity of a wireless backhaul for the distribution level of the smart grid," *IEEE Syst. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 521–532, 2014, doi: 10.1109/JSYST.2013.2260701.
- [90] "Households according to number of members by settlements, Serbian census results," *Republic Bureau of Statistics*, 2011. [http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/userFiles/file/Popis stanovnistva 2011/LOOPIA/Stanovnistvo/Naselja/2_Domacinstva prema broju clanova, po naseljima.xls](http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/userFiles/file/Popis_stanovnistva_2011/LOOPIA/Stanovnistvo/Naselja/2_Domacinstva_prema_broju_clanova_po_naseljima.xls) (accessed Jan. 01, 2018).
- [91] C. Casetti, M. Gerla, S. Mascolo, M. Y. Sanadidi, and R. Wang, "TCP Westwood: End-to-end congestion control for wired/wireless networks," *Wirel. Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 467–479, 2002, doi: 10.1023/A:1016590112381.
- [92] C. P. Fu and S. C. Liew, "TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 2, pp. 216–228, 2003, doi: 10.1109/JSAC.2002.807336.
- [93] R. Morris, "Scalable TCP congestion control," *INFOCOM 2000 Ninet. Annu. Jt. Conf. IEEE Comput. Commun. Soc. Proc. IEEE*, vol. 3, pp. 1176–1183, 2000, doi: 10.1109/INFCOM.2000.832487.
- [94] S.-Y. Yun, C.-M. Chu, S.-C. Kwon, I.-K. Song, and J.-H. Choi, "The Development and Empirical Evaluation of the Korean Smart Distribution Management System," *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1332–1362, 2014, doi: 10.3390/en7031332.
- [95] S. Ha, Y. Kim, L. Le, I. Rhee, and L. Xu, "A step toward realistic performance evaluation of high-speed TCP variants," *Fourth Int. Work. Protoc. Fast Long-Distance Networks*, 2006.
- [96] A. Mohemmed, R. Mickey, A. L. Akhila, and S. Ashok, "Open source implementation of IEEE C37.118-2011 protocol and serial communication interface for an FPGA based phasor measurement unit," in *RTEICT 2017 - 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, Proceedings*, 2018, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256606.

Biografija i bibliografija autora

Biografija

Mita Čokić je rođen 5. novembra 1985. godine. Diplomski–master rad je odbranio 2009. godine na temu „Jedno rešenje programske podrške za paralelno izvršavanje elektroenergetskih proračuna“ na departmanu za „Računarstvo i automatiku“ Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Od 2010. godine je zaposlen u kompaniji „*Schneider Electric DMS NS*“ u Novom Sadu gde je radio kao razvojni inženjer, stariji inženjer, rukovodilac tima, dok sada radi kao arhitekta programskih rešenja. Na Fakultetu tehničkih nauka je angažovan delom radnog vremena na predmetu „Industrijski komunikacioni protokoli u elektroenergetskim sistemima“. Upisao je doktorske studije na departmanu za „Energetiku, elektroniku i telekomunikacije“ na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Dobitnik je sledećih nagrada:

1. „Godišnja nagrada i plaketa za angažovanje na uspostavljanju novog studijskog programa – Elektroenergetski softverski inženjering i poseban doprinos u standardizaciji načina izvođenja praktičnih vežbi i kvaliteta izvornog koda koji se koristi na vežbama“, decembar 2014. godina, Fakultet tehničkih nauka, Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Katedra za elektroenergetiku i elektroenergetski softverski inženjering.
2. „Special award for Achievement – for Significant Contribution to Establishing ESI Department“, Decembar 2014, Schneider Electric DMS NS.
3. „Special Award For Achievement for contribution in developing ADMS , achieving critical milestones and knowledge sharing“, decembar 2016, Schneider Electric DMS NS.
4. „Most Valuable Professional“, decembar 2018, Schneider Electric DMS NS

Bibliografija

1. M. Cokic and I. Seskar, "Software defined network management for dynamic smart GRID traffic", *Future Generation Computer Systems*, Volume 96, July 2019, pp. 270–282. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.022
2. M. Cokic and I. Seskar, "Analysis of TCP Traffic in Smart Grid Using SDN Based QoS," 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR), *Belgrade, 2018*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8611800
3. B. Atlagić, M. Čokić and M. Šagi, "Concept of a SCADA system designed for education and research," 2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), *Belgrade, 2014*, pp. 1047–1050. DOI: 10.1109/TELFOR.2014.7034586
M. Čokić, M. Popović i D. Popović, "Jedno rešenje programske podrške za paralelno izvršavanje elektroenergetskih proračuna", *Elektroprivreda*, 2010, broj 2, pp 168–176, UDK: 621.31; 339.13.01.42