УНИВЕРЗИТЕТ У
НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ
НАУКА

Развој децентрализованог система са дистрибуираном главном књигом за подршку трговању енергијом

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
др Душан Гајић

Кандидат:
Небојша Хорват

Нови Сад, 2025. године

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА **ОБРАЗАЦ – 5а**

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА[1]

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Небојша Хорват
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Душан Гајић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Развој децентрализованог система са дистрибуираном главном књигом за подршку трговању енергијом
Језик и писмо рада:	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница 167 Поглавља 7 Референци 130 Табела 10 Слика 33 Графикона 0 Прилога 2
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Примењене рачунарске науке и информатика
Кључне речи / предметна одредница:	Трговање енергијом, технологија дистрибуиране главне књиге, мерења перформанси, блокчејн, паметне мреже, обновљива енергија
Апстракт на језику рада:	Докторска дисертација предлаже софтверску архитектура за подршку трговању електричном енергијом. Архитектура се прилагођава постојећим електроенергетским мрежама уз моделовање широког скупа постојећих корисника савремених електроенергетских мреже као учесника софтверског система. Софтверски систем за подршку трговању обезбеђује и боље праћење извора електричне енергије као и праћење свих активности на електроенергетској мрежи уз пружање механизама за очување стабилности мреже. Комуникациони модел између учесника је осмишљен тако да само неопходни чланови за трговање учествују у трансакцијама. Трансакције се не чувају у једном великом ланцу блокова као што је то случај код највећег броја сличних решења пронађених у литератури. Свака група учесника формира засебан ланац криптографски повезаних објеката чиме се смањује редунданса података и остварује ниво приватности уз очување свих

[1] Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:
5б – Изјава о ауторству;
5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;
5г – Изјава о коришћењу.
Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не кориче се са радом.

	безбедносних предности које нуде блокчејн системи. Употребом предложених функционалности попут верификације извора енергије и складиштења енергије које се ослања на тржишне механизме, подстичу се мали произвођачи енергије да буду активни учесници електроенергетских мрежа. Предложени систем кроз употребу технологија дистрибуиране главне књиге такође помаже и у стабилизацији мреже кроз укључивање правила чијом применом би се смањио штетан утицај малих произвођача на стабилност традиционално монолитних електроенергетских мрежа. У дисертацији је предложена и методологија за тестирање перформанси предложеног система. Методологија има за циљ да измери перформансе имплементираног прототипа предложеног система са фокусом на мерење: времена извршавања трансакција, потрошње рачунарских ресурса и потрошње електричне енергије. Методологија предлаже генеричко решење које се лако може проширити на мерење перформанси других дистрибуираних система који нису коришћени за исту сврху. У дисертацији су представљени резултати експерименталне евалуације перформанси прототипа имплементираног на основу предложене архитектуре софтверског система за трговање. Извршен је низ експеримената према предложеној методологији. Резултати указују на то да систем добро скалира када су у питању већина кључних перформанси уз изражено малу потрошњу енергије у поређењу са сличним системима.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	24. 10. 2024.
Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Дину Драган, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Владимир Ћирић, редовни професор, Електронски факултет, Универзитет у Нишу Члан: др Срђан Вукмировић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Вељко Петровић, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

KEY WORD DOCUMENTATION[2]

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Nebojša Horvat
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Dr Dušan Gajić, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title in English:	Development of a Decentralized System with a Distributed Ledger for Energy Trading
Language and script:	Serbian (latin)
Physical description:	Number of: Pages 167 Chapters 7 References 130 Tables 10 Illustrations 33 Graphs 0 Appendices 2
Scientific field:	Computing and Control Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Applied Computer Science and Informatics
Subject, Key words:	Energy trading, distributed ledger technology, performance evaluation, blockchain, smart grids, renewable energy
Abstract in English:	This doctoral dissertation proposes software architecture for supporting energy trading. The architecture adapts to existing power networks by modeling a broad set of existing users of modern power grids as participants in the software system. The software system provides improved tracking of electricity sources and monitoring of all activities on the power grid, while offering mechanisms to maintain network stability. The communication model among participants is designed so that only those members necessary for trading take part in transactions. Transactions are not stored in a single large blockchain, as is the case with most similar solutions found in the literature. Instead, each participant group forms a separate chain of cryptographically linked objects, which reduces data redundancy and achieves a degree of privacy, while preserving all the security advantages offered by blockchain systems. By employing the proposed functionalities—such as energy-source verification and energy storage that relies on market mechanisms—small energy producers are encouraged to become active participants in power

[2] The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:
5б – Statement on the authorship,
5в – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,
5г – Copyright statement.
The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

	networks. Through the use of distributed-ledger technologies, the proposed system also helps stabilize the grid by incorporating rules whose application would mitigate the adverse impact of small producers on the stability of traditionally monolithic power networks. The dissertation also proposes a methodology for performance testing of the proposed system. The methodology aims to measure the performance of the implemented prototype, focusing on transaction execution times, computational resource usage, and electricity consumption. This methodology suggests a generic solution easily extendable to performance measurements of other distributed ledger and blockchain systems used for different purposes. The research also presents experimental performance evaluation results for a prototype based on the proposed energy trading software architecture. A series of experiments were conducted following the proposed methodology. Results indicate that the system generally scales well regarding key performance metrics and exhibits significantly lower energy consumption compared to similar systems.
Date of endorsement by the scientific board:	24. 10. 2024.
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	Chair: Dr Dinu Dragan, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr Vladimir Ćirić, Full Professor, Faculty of Electronic Engineering, University of Niš Member: Dr Srđan Vukmirović, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr Veljko Petrović, Assistant Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note:	

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

ИЗЈАВА О НЕПОСТОЈАЊУ СУКОБА ИНТЕРЕСА

Изјављујем да нисам у сукобу интереса у односу ментор – кандидат и да нисам члан породице (супружник или ванбрачни партнер, родитељ или усвојитељ, дете или усвојеник), повезано лице (крвни сродник ментора/кандидата у правој линији, односно у побочној линији закључно са другим степеном сродства, као ни физичко лице које се према другим основама и околностима може оправдано сматрати интересно повезаним са ментором или кандидатом), односно да нисам зависан/на од ментора/кандидата, да не постоје околности које би могле да утичу на моју непристрасност, нити да стичем било какве користи или погодности за себе или друго лице било позитивним или негативним исходом, као и да немам приватни интерес који утиче, може да утиче или изгледа као да утиче на однос ментор-кандидат.

У Новом Саду, дана _____

Ментор

_____

Кандидат

_____

Razvoj decentralizovanog sistema sa distribuiranom glavnom knjigom za podršku trgovanju energijom

Nebojša Horvat

Master inženjer elektrotehnike i računarstva,
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,
Republika Srbija, 2019.

Diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva,
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,
Republika Srbija, 2018.

za zvanje

Doktora tehničkih nauka

Disertacija podneta na uvid

Departmanu za računarstvo i automatiku
Fakulteta tehničkih nauka,
Univerziteta u Novom Sadu,
Republike Srbije.

2025.

Mentor:

dr Dušan Gajić, vanredni profesor
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Republika Srbija.
UNO: Primenjene računarske nauke i informatika

Članovi komisije za odbranu disertacije:

dr Dinu Dragan, redovni profesor, predsednik
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Republika Srbija.
UNO: Primenjene računarske nauke i informatika

dr Vladimir Ćirić, redovni profesor, član
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Republika Srbija.
UNO: Računarstvo i informatika

dr Srđan Vukmirović, redovni profesor, član
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Republika Srbija.
Republika Srbija.
UNO: Automatika i upravljanje sistemima

dr Veljko Petrović, docent, član
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Republika Srbija.
UNO: Primenjene računarske nauke i informatika

Sadržaj

Lista publikacija **13**

Lista slika **15**

Lista tabela **17**

Rezime **19**

Abstract **21**

Skraćenice **23**

Srpsko-engleski rečnik termina **25**

1 Uvodna razmatranja, predmet i ciljevi istraživanja **29**
1.1 Uvodna razmatranja i motivacija 29
1.1.1 Izvori električne energije 29
1.1.2 Postojeći softverski sistemi za trgovinu energijom i motivacija za istraživanje 31
1.2 Predmet i ciljevi istraživanja 34
1.3 Doprinosi teze 35
1.4 Struktura disertacije 37

2 Teorijske osnove istraživanja 39
2.1 Distribuirani sistemi . . . 39
2.1.1 Arhitekture distribuiranih sistema . . . 40
2.2 Tehnologija distribuirane glavne knjige (DLT) i blokčejn . . . 45
2.2.1 Konsenzus algoritmi . . . 50
2.3 Korda . . . 54
2.4 Struktura elektroenergetskih mreža . . . 57

3 Pregled literature 63
3.1 Upotreba DLT u energetici . . . 63
3.1.1 Postojeća rešenja za podršku trgovanja električnom energijom bazirana na DLT tehnologiji . . . 66
3.1.2 Arhitekture postojećih rešenja za podršku trgovanja električnom energijom bazirana na DLT tehnologiji . . . 71
3.2 Performanse DLT i blokčejn sistema . . . 74
3.2.1 Merenje potrošnje energije . . . 78

4 Distribuirana softverska arhitektura za podršku trgovanju energijom 81
4.1 Struktura i ciljevi arhitekture . . . 81
4.2 Učesnici u mreži . . . 84
4.3 Arhitektura sistema . . . 86
4.3.1 Optimizacija broja čvorova . . . 89
4.4 DLT podsistem . . . 90
4.4.1 Pravljenje energetskog obećanja . . . 93
4.4.2 Pravljenje aukcije . . . 94
4.4.3 Licitacija . . . 95
4.4.4 Poravnanje aukcije . . . 96
4.4.5 Završetak aukcije . . . 96
4.4.6 Provera isporuke . . . 96
4.5 Diskusija . . . 97
4.5.1 Glavni rizici . . . 98
4.6 Dodatne funkcionalnosti . . . 101
4.6.1 Rasparčavanje i spajanje energetskih obećanja . . . 101
4.6.2 Automatizacija trgovine . . . 102
4.6.3 Alternativne metode trgovine . . . 102
4.7 Implementacija prototipa sistema . . . 103

5 Metodologija za merenje performansi distribuiranih softverskih sistema 107
5.1 Evaluacioni protokol . . . 109

5.2 Uopštavanje metodologije za merenje performansi proizvoljnog DLT sistema 114

6 Eksperimenti 117
6.1 Eksperimentalno okruženje 117
6.1.1 Specifikacija okruženja sa jednim računarom 118
6.1.2 Specifikacija okruženja na računarskom klasteru 119
6.2 Primena opisane metodologije nad predloženim softverskim sistemom . 123
6.2.1 Testiranje performansi na jednom računaru 123
6.2.2 Testiranje performansi na Beovulf klasteru računara 124
6.3 Eksperimentalni rezultati 131
6.4 Diskusija rezultata 132
6.4.1 Eksperimenti izvršeni na jednom računar 132
6.4.2 Eksperimenti izvršeni na Beovulf klasteru računara 135

7 Zaključak 145

Literatura 149

Dodaci 159
A Tabele sa apsolutnim rezultatima 161
B Pseudokodovi tokova 165

Lista publikacija

Publikacije u časopisima:

Horvat N., Gajić D., Trifunović P., Petrović V., Dragan D., Katić V. *Performance Evaluation of a Distributed Ledger-based Platform for Renewable Energy Trading*, IEEE Access, vol. 12 (2024), pp. 86013-86033, DOI: https://doi.org/ 10.1109/ACCESS.2024.3416612

Gajić D., Petrović V., Horvat N., Dragan D., Stanisavljević A., Katić V., Popović J. *A Distributed Ledger-Based Automated Marketplace for the Decentralized Trading of Renewable Energy in Smart Grids* , Energies, Vol. 15, No. 6, pp. 2121-2147 (2022), DOI:https://doi.org/10.3390/en15062121

Petrović V. B., Gojić G., Dragan D., Gajić D. B., Horvat N., Turović R., and Oros A. *Robustness of deep learning methods for ocular fundus segmentation: Evaluation of blur sensitivity.* Concurrency and Computation: Practice and Experience 34, no. 14 (2022): e6809.

Publikacije na konferencijama:

Petrović, V.B., Gojić, G., Dragan, D., Gajić, D. B., Horvat, N., Turović, R., Oros, A. *Robustness of Deep Learning Methods for Ocular Fundus Segmentation: Evaluation of Blur Sensitivity*, Concurrency and Computation: Practice and Experience; vol. 34, no.14 (2022), p.e6809. DOI: https://doi.org/10.1002/cpe.6809

Gajić D., Petrović V., Horvat N., Dragan D., Stanisavljević A., Katić V. *Blockchain-based Smart Decentralized Energy Trading for Grids with Renewable Energy Systems*, 21. International Symposium POWER ELECTRONICS Ee, Novi Sad (2021) pp. 1-7, DOI: https://doi.org/10.1109/Ee53374.2021.9628324

Horvat N., Ivković V., Todorović N., Ivančević V., Gajić D., Luković I., *Data Architecture for Cryptocurrency Real-time Data Processing*, 10. International Conference on

Information Science and Technology (ICIST), Kopaonik, Serbia (2020), pp. 151-155

Petrović, V., Gojić, G., Dragan, D., Gajić. D. B., Horvat, N., Turović, R., Oros, A., *Robustness of Deep Learning Methods for Ocular Fundus Segmentation: Evaluation of Blur Sensitivity*, 2020 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), Novi Sad, Serbia (2020), pp. 1-7, DOI: https://doi.org/10.1109/INISTA49547.2020.9194612.

Gojić, G., Petrović, V., Turović, R., Dragan, D., Oros A., Gajić D. B., Horvat N., *Deep Learning Methods for Retinal Blood Vessel Segmentation: Evaluation on Images with Retinopathy of Prematurity*, In 2020 IEEE 18th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), Subotica, Serbia, pp.131–136. (2020), DOI: 10.1109/SISY50555.2020.9217082

Lista slika

Uvodna razmatranja, predmet i ciljevi istraživanja **29**
1.1 Pregled izvora korišćenih za proizvodnju električne energije 30
1.2 Pregled obnovljivih izvora korišćenih za proizvodnju električne energije 31
1.3 Promena cene proizvodnje energije iz različitih izvora u periodu između 2010. i 2022. godine 32

Teorijske osnove istraživanja **39**
2.1 Centralizovana i distribuirana glavna knjiga. 46
2.2 Lanac blokova 48
2.3 Tradicionalna struktura elektroenergetskih mreža 60
2.4 Moderna struktura elektroenergetskih mreža 61

Pregled literature **63**
3.1 Raspodela publikacija baziranih na DLT tehnologiji prema njihovoj upotrebi u energetici 64
3.2 Raspodela upotrebe DLT tehnologije u energetici 2019. godine 65
3.3 Raspodela upotrebe DLT tehnologije u energetici 2022. godine 65
3.4 Arhitektura Itirijum mreže 72
3.5 Arhitektura bazirana na Hajperledžer Febrik 73
3.6 Arhitektura bazirana na Hajperledžer Febrik uz upotrebu kalana . . . 74

Pregled Arhitekture **81**
4.1 Arhitektura sistema na visokom nivou apstrakcije 87

4.2 Korda tokovi u predloženoj arhitekturi 93

107

Metodologija **107**
5.1 Pregled metodologije 108
5.2 Pregled evaluacionog protokola 113

Eksperimenti **117**
6.1 Fizički računari u klasteru i Korda čvorovi koji se nalaze u njima za vreme trajanja eksperimenta **auto-exp-0** 120
6.2 C.A. 8336 instrument za merenje potrošnje 122
6.3 Povezivanje mernog instrumenta pri merenju potrošnje energije klastera 123
6.4 Skripte korišćene za automatizaciju merenja i njihov raspored na fizičkim čvorovima klastera 129
6.5 Grafikon potrošnje memorije u odnosu na broj paralelnih zahteva, podeljen po zadacima i klasama upotrebe. Boje označavaju broj čvorova 133
6.6 Vreme po zahtevu u odnosu na broj zahteva, podeljen prema broju čvorova i funkcionalnostima 134
6.7 Vreme u odnosu na broj čvorova, zahteva i tip komande (nepotpuna implementacija) 136
6.8 Vreme u odnosu na broj čvorova uz promenu broja zahteva i tip komande (potpuna implementacija) 137
6.9 Vreme u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i tip komande (nepotpuna implementacija) 137
6.10 Vreme u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i tip komande (potpuna implementacija) 138
6.11 Upotreba memorije u odnosu na broj čvorova i zahteva (nepotpuna implementacija) 139
6.12 Upotreba memorije u odnosu na broj čvorova i zahteva (potpuna implementacija) 139
6.13 Upotreba memorije u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i zahteva (nepotpuna implementacija) 140
6.14 Upotreba memorije u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i zahteva (potpuna implementacija) 141
6.15 Karbonski otisak u odnosu na broj čvorova 142
6.16 Karbonski otisak u odnosu na broj čvorova za sve tipove zahteva i eksperimente 142

Lista tabela

Teorijske osnove istraživanja **54**
2.1 Uporedni prikaz konsenzus algoritama PBFT, PoW, PoS i Raft 55
2.2 Razlike između Korde i tradicionalnih blokčejnova (Itirijuma, Bitkoina i Hajperledžer Febrika). 58

Eksperimenti **118**
6.1 Konfiguracija računara na kom je rađena prva grupa eksperimenata . . 118
6.2 Softver korišten na računaru na kom je izvršena prva grupa eksperimenata 119
6.3 Konfiguracija računara u klasteru 121
6.4 Softver korišten na svim računarima klastera na kojim je izvršena druga grupa eksperimenata 122
6.5 Izmereni CO_2 otisak energije korišćene u eksperimentima 132

Dodatak A **161**
A.1 Rezultati merenja performansi na jednom računaru 162
A.2 Usrednjeni rezultati potrošnje računarskih resursa za drugu grupu eksperimenata 163
A.3 Usrednjeni rezultati potrošnje računarskih resursa za drugu grupu eksperimenata 164

Rezime

Primarna motivacija za istraživanje predstavljeno u ovoj disertaciji je uviđanje da postojeće softverske arhitekture za podršku trgovanju električnom energijom ne uzimaju u obzir većinu aspekata koje donosi novonastala distribuiranost elektroenergetskih mreža i stoga ne predstavljaju adekvatna rešenja u novim okolnostima. Sistemi za trgovinu električnom energijom nisu prilagođeni velikom broju malih potrošača koji su istovremeno i proizvođači - prozjumeri (engl. prosumer). Postavljena je hipoteza da predlog nove decentralizovane arhitekture softverskog sistema za podršku trgovanju može omogućiti mnogo bolju prilagođenost i povećanu efikasnost u novonastaloj strukturi energetskog sistema. Sistemi specijalno optimizovani za distribuiranu trgovinu energijom bi takođe podstakli nove prozjumere da se priključe mreži. Dodatno, većina novonastalih sistema za trgovinu energijom predstavljenih u literaturi koji uzimaju u obzir distribuiranost elektroenergetskih mreža trenutno predlažu rešenja koja su često vrlo energetski neefikasna i pružaju loše performanse. Stoga je implementacija sistema čija je efikasnost bitan faktor jedan od glavnih pokretača za ovo istraživanje.

Cilj istraživanja predstavljenog u ovoj doktorskoj disertaciji jeste razvoj arhitekture i predlog tehnologije pogodne za realizaciju decentralizovanog sistema koji se oslanja na distribuiranu glavnu knjigu za podršku trgovanju električnom energijom primarno proizvedenom iz obnovljivih izvora. Izvršeno je i testiranje performansi razvijenog sistema i utvrđivanje u kojoj meri je predložena arhitektura pogodna za korišćenje u ovoj oblasti.

Predložena softverska arhitektura za podršku trgovanju energijom se prilagođava postojećim elektroenergetskim mrežama uz modelovanje postojećih korisnika mreža i uključivanje modela novih članova poput verifikacionih agencija i mrežnog nadzornog tela. Novi članovi za cilj imaju bolje praćenje izvora električne energije kao i praćenje aktivnosti na elektroenergetskoj mreži uz pružanje mehanizama za očuvanje stabilnosti mreže. Komunikacioni model između učesnika je osmišljen tako da samo neophodni članovi za trgovanje učestvuju u transakcijama. Transakcije se ne čuvaju u jednom velikom lancu blokova kao što je to slučaj kod najvećeg broja sličnih rešenja pronađenih u literaturi. Svaka grupa učesnika formira zaseban lanac kriptografski

povezanih objekata čime se smanjuje redundansa podataka i ostvaruje nivo privatnosti uz očuvanje svih bezbednosnih prednosti koje nude blokčejn sistemi. Upotrebom predloženih funkcionalnosti poput verifikacije izvora energije i skladištenja energije koje se oslanja na tržišne mehanizme, podstiču se mali proizvođači energije da budu aktivni učesnici elektroenergetskih mreža. Predloženi sistem kroz upotrebu DLT (engl. Distributed Ledger Technology) takođe pomaže i u stabilizaciji mreže kroz uključivanje pravila čijom primenom bi se smanjio štetan uticaj malih proizvođača na stabilnost tradicionalno monolitnih elektroenergetskih mreža.

U disertaciji je predložena i metodologija za testiranje performansi predloženog sistema. Metodologija ima za cilj da izmeri performanse implementiranog prototipa predloženog sistema sa fokusom na merenje: vremena izvršavanja transakcija, potrošnje računarskih resursa i potrošnje električne energije. Metodologija predlaže generičko rešenje koje se lako može proširiti na merenje performansi drugih DLT i blokčejn sistema koji nisu korišćeni za istu svrhu. Posmatranje potrošnje električne energije je ključni deo metodologije koji stavlja fokus na praktičnu upotrebljivost sistema, njegov CO_2 otisak, kao i dugotrajnu isplativost korišćenja kompleksnih distribuiranih softverskih rešenja. Neretko u praksi kompleksnost softverskog sistema utiče na to da njegova upotreba iziskuje mnogo resursa čija potrošnja nije opravdana prednostima koje sistem donosi. Stoga je jedan od ciljeva metodologije da omogući detekciju takvih slučajeva.

U istraživanju su predstavljeni i rezultati eksperimentalne evaluacije performansi prototipa implementiranog na osnovu predložene arhitekture softverskog sistema za trgovanje. Izvršen je niz eksperimenata prema predloženoj metodologiji. Rezultati ukazuju na to da sistem pretežno dobro skalira kada su u pitanju većina ključnih performansi uz izraženo malu potrošnju energije u poređenju sa sličnim sistemima koji su implementirani uz upotrebu Itirijum (engl. Ethereum) tehnologije. Itirijum je u literaturi dominantna tehnologija koja se koristi za implementaciju sličnih sistema, i rezultati pokazuju da upotreba alternativnih arhitektura uz upotrebu DLT može pružiti izuzetno dobre rezultate.

Glavni doprinosi istraživanja su: predlog softverskog sistema sa distribuiranom glavnom knjigom za trgovanje energijom pretežno dobijenom iz obnovljivih izvora, predlog metodologije za testiranje performansi opisanog sistema za trgovanje i njena generalizacija, kao i eksperimentalna potvrda povoljnih performansi i niske energetske potrošnje predloženog distribuiranog sistema.

Abstract

The primary motivation for the research presented in this dissertation stems from the recognizing that existing electricity trading systems do not fully account for the newly emerged distributed nature of power grids and, therefore, do not represent adequate solutions under the new circumstances. Existing energy trading systems are inadequately adapted for accommodating a large number of small consumers who are also producers, prosumers. The hypothesis has been set that the proposal of a new decentralized software system architecture for trading support can enable much better adaptability and increased efficiency in the newly emerging structure of the energy system. Systems specifically optimized for distributed energy trading would also encourage new prosumers to connect to the grid. Additionally, most existing energy trading systems described in the literature, which consider the distributed nature of power grids, currently propose solutions that are often energy-inefficient and have low performance scores. Hence, the implementation of an efficient software system for distributed energy trading is one of the main drivers of this research.

The objective of the research presented in this doctoral dissertation is to propose an architecture as well as suitable technology for realizing a decentralized system based on distributed ledger technology (DLT) to support electricity trading primarily produced from renewable energy sources. Furthermore, the aim is to test the performance of the developed system and assess how suitable the proposed architecture is for practical use in this field.

The proposed software architecture for supporting energy trading adapts to existing power grids by modeling current grid participants and incorporating a model of new members, such as verification agencies and network supervisory bodies (model of grid authority). The new members ought to improve energy source monitoring and grid activity tracking while providing mechanisms to maintain grid stability. The communication model among participants of the DLT network ensures that only the essential trading members participate in transactions. These transactions are not stored in a single large blockchain, like in most similar solutions in the literature. Instead, each participant group forms a separate chain of cryptographically linked

objects, reducing data redundancy and maintaining privacy without compromising blockchain security benefits. The proposed functionalities, such as energy source verification and market-based energy storage encourage small producers to actively participate in power grids. Through the application of DLT, the proposed system also contributes to grid stabilization by implementing rules that reduce adverse impacts from small producers on traditionally monolithic power grids.

This dissertation also proposes a methodology for performance testing of the proposed system. The methodology aims to measure the performance of the implemented prototype, focusing on transaction execution times, computational resource usage, and energy consumption. This methodology suggests a generic solution easily extendable to performance measurements of other distributed ledger and blockchain systems used for different purposes. Including energy consumption is a crucial part of the methodology. It helps to track the system's carbon footprint, practical usability, and the long-term cost-effectiveness of complex distributed software solutions. Often, the complexity of software systems leads to substantial resource consumption unjustified by the benefits provided by the system, and the methodology aims to enable the detection of such cases.

The research also presents experimental performance evaluation results for a prototype based on the proposed energy trading software architecture. A series of experiments were conducted following the proposed methodology. Results indicate that the system generally scales well regarding key performance metrics and exhibits significantly lower energy consumption compared to similar systems implemented using Ethereum technology. Ethereum is the dominant technology in the literature for implementing similar systems, and the results demonstrate that alternative architectures utilizing DLT technologies can yield exceptionally favorable outcomes.

The main contributions of this research include: proposing a distributed ledger-based software system for trading renewable energy, developing a methodology for performance testing of the described trading system and its generalization, and experimentally validating the favorable performance and low energy consumption of the proposed distributed system.

Skraćenice

DLT	Distributed Ledger Technology - Tehnologija distribuirane glavne knjige
P2P	Peer to Peer - Ravnopravan prema ravnopravnom
EO	Energetsko obećanje
MNT	Mrežno nadzorno telo
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance - Praktična Vizantijska otpornost na greške
PoW	Proof of Work - Dokaz urađenog posla
PoS	Proof of Stake - Dokaz o udelu
API	Application Programming Interface - Programski interfejs aplikacije
CPU	Central Processing Unit - Centralna procesna jedinica
CSV	Comma Separated Values - Vred-

	nosti razdvojene zarezom
ERC	Ethereum Request for Comment - Iterijum predlog
HTTP	Hypertext Transfer Protocol - Protokol za prenos hiperteksta
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure - Bezbedni protokol za prenos hiperteksta
ID	IDentification - Identifikacija
IP	Internet Protocol - Internet protokol
NFT	Non-Fungible Tokens - Nezamenjivi token
PC	Personal Computer - Lični računar
RAM	Random Access Memory - Memorija sa slučajnim pristupom
REST	Representational State Transfer - Prenos reprezentativnog stanja
RPC	Remote Procedure Call - Poziv udaljene procedure
SSH	Secure Shell - Bezbedni šel
TCP	Transmission Control Protocol - Protokol za kontrolu prenosa

Srpsko-engleski rečnik termina

Prozjumeri	Prosumer
Slojevite arhitekture	Layered system architectures
Simetrično distribuirane arhitekture	Symmetrically distributed system architectures
Hibridne arhitekture	Hybrid system architectures
Plavljenje	Flooding
Nasumična šetnja	Random walks
Hijerarhijski organizovane mreže	Hierarchically organized networks
Računarski sistemi u oblaku	Cloud computing systems
Dvojno knjigovodstvo	Double entry bookkeeping
Glavna knjiga	Ledger
Model podataka	Data model
Jezik transakcije	Language of transactions
Protokol	Protocol
Vremenski otisak	Timestamp
Nons	Nonce

Početni blok	Genesis block
Problem dvostruke potrošnje	Double spending problem
Rudari	Miners
Ništa na ulogu	Nothing at Stake
Notar	Notary
Ugovor	Contract
Soliditi	Solidity
Protok transakcija	Throughput
Bruklin Mikrogrid	Brooklyn Microgrid
Digitalne elektrane	Digital Power Plants
Vipavr	WePower
San Kontrakts	SunContract
Elektron	Electron
Frejmvork	Framework
Kvorum	Quorum
Multičejn	Multichain
Ripl	Ripple
Hajperledžer Kaliper	Hyperledger Caliper
Optimistični rolapi	Optimistic rollups
Mrežno nadzorno telo	Grid authority
Fjučersi	Futures
Skladište energije	Energy storage provider

Trgovac energijom	Speculator
Bitkoin	Bitcoin
Itirijum	Ethereum
Privatna distribuirana glavna knjiga	Private permissioned distributed ledger
Hajperledžer Fabrik	Hyperledger Fabric
Korda	Corda
Sef	Vault
Energetsko obećanje	Power Promise
Stanje aukcije	Auction state
Posmatrači	Observers
Izuzetak	Exception
Jedinstvena tačka otkaza	Single point of failure
Kriptovaluta	Cryptocurrency
Fungabilnost	Fungibility
Tržište	Marketplace
Transakcioni bazen	Transaction pool
Šel	Shell
Pajton	Python
Beovulf	Beowulf
Kreiranje energetskog obećanja	Create power promise
Kreiranje aukcije	Create auction
Licitiranje	Create bid

Poglavlje 1

Uvodna razmatranja, predmet i ciljevi istraživanja

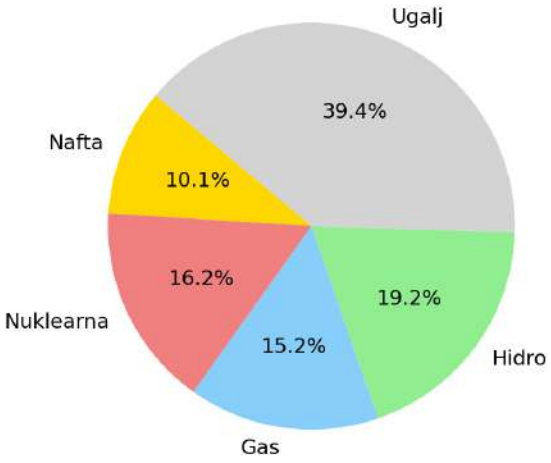
Uvodno poglavlje je podeljeno u četiri sekcije: uvodna razmatranja, ciljevi istraživanja, doprinosi disertacije i sažet pregled sadržaja disertacije. Uvodna razmatranja se osvrću na probleme koji se rešavaju u ovoj disertaciji upotrebom tehnologije distribuirane glavne knjige (engl. Distributed Ledger Technology - DLT), kao i motivacijom za sprovedeno istraživanje. U naredne dve celine su formulisani ciljevi istraživanja i navedeni doprinosi. Na kraju poglavlja je dat kratak pregled sadržaja preostalih poglavlja u ovoj disertaciji.

1.1 Uvodna razmatranja i motivacija

Primarni problem na koji se disertacija fokusira je razvoj efikasnih distribuiranih softverskih rešenja za podršku trgovanju električnom energijom koja je primarno proizvedena iz obnovljivih izvora. Prozjumeri (engl. Prosumer) [1], tj. potrošači energije koji kroz instalaciju solarnih panela ili malih vetrogeneratora postaju i proizvođači, postaju sve češća pojava u elektroenergetskim mrežama [1,2]. Prozjumeri su najčešće domaćinstva ili kompanije koje koriste obnovljive izvore energije da zadovolje svoje potrebe za potrošnjom energije. Međutim, oni često u povoljnim okolnostima proizvode više energije nego što mogu da potroše i u tom slučaju žele da prodaju tu energiju tako što bi je vratili u elektroenergetski mrežni sistem [3]. Mnogi prozjumeri su već priključeni na postojeće elektroenergetske mreže i neometano prodaju svoj višak energije. Kako na prvi pogled nije lako uvideti probleme koje dolaze sa malim proizvođačima energije, kao ni potrebu za novim sistemom za trgovanje obnovljivom električnom energijom, uvodno poglavlje ima za cilj da opiše postojeće stanje i objasni mogućnosti daljeg razvoja.

1.1.1 Izvori električne energije

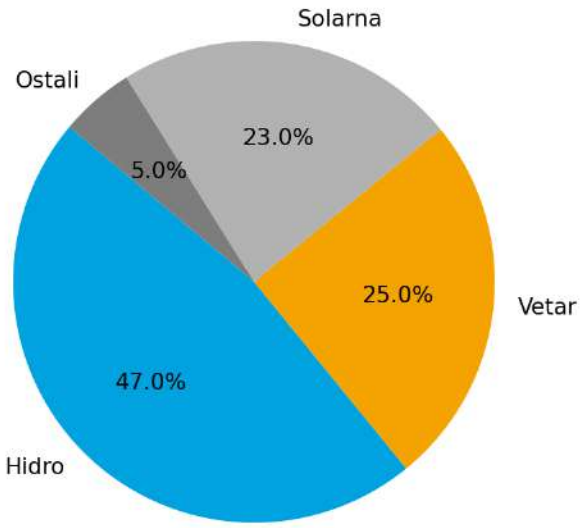
Na Slici 1.1 se vidi raspodela proizvedene električne energije prema izvorima energije pri upotrebi tradicionalnih metoda [4]. Najzastupljeniji izvor neobnovljive energije je ugalj, sa čak 39,4% udela, dok gas sa 15,2% i nafta sa 10,1% takođe čine izvore neobnovljive energije koji su značajno zastupljeni. Ukoliko nuklearnu energiju ubrajamo u zelene



Slika 1.1: Pregled izvora korišćenih za proizvodnju električne energije [5].

izvore energije koji ne utiču štetno na životnu sredinu, zaključujemo da se čak 64% električne energije proizvodi iz izvora koji emituju velike količine CO_2 gasova. Dakle, postoji ogroman prostor za upotrebu obnovljivih izvora energije kako bi se zamenila tradicionalna fosilna goriva. Povećana upotreba takozvanih „zelenih" izvora energije poput solarnih panela i vetrogeneratora je neophodna kako bi se smanjili štetni uticaji na životnu sredinu. Zeleni izvori energije su dodatno poželjni zbog njihove obnovljive prirode. Sunčeva energija i snaga vetra, koje su dostupne u prirodi u izobilju, ne mogu se potrošiti i ne zahtevaju štetno iskopavanje i ekstrakciju kao u slučaju nafte, gasa i uglja.

Hidroelektrane su najstariji obnovljivi izvori energije i one i dalje dominiraju kada je u pitanju proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora. Međutim, solarni paneli i vetrogeneratori se brzo razvijaju (videti Sliku 1.2). Istorijski gledano, predviđanja za naredne godine kada je u pitanju razvoj solarne energije su uglavnom bila netačna pošto je količina energije proizvedene pomoću solarnih panela konstantno prevazilazila očekivanja [6]. Predviđanja ukazuju na to da će cena solarnih panela uskoro postati toliko pristupačna da će oni biti najjeftiniji način za proizvodnju električne energije. Na Slici 1.3 vidi se da je solarna energija dostigla najveće smanjenje kada je u pitanju

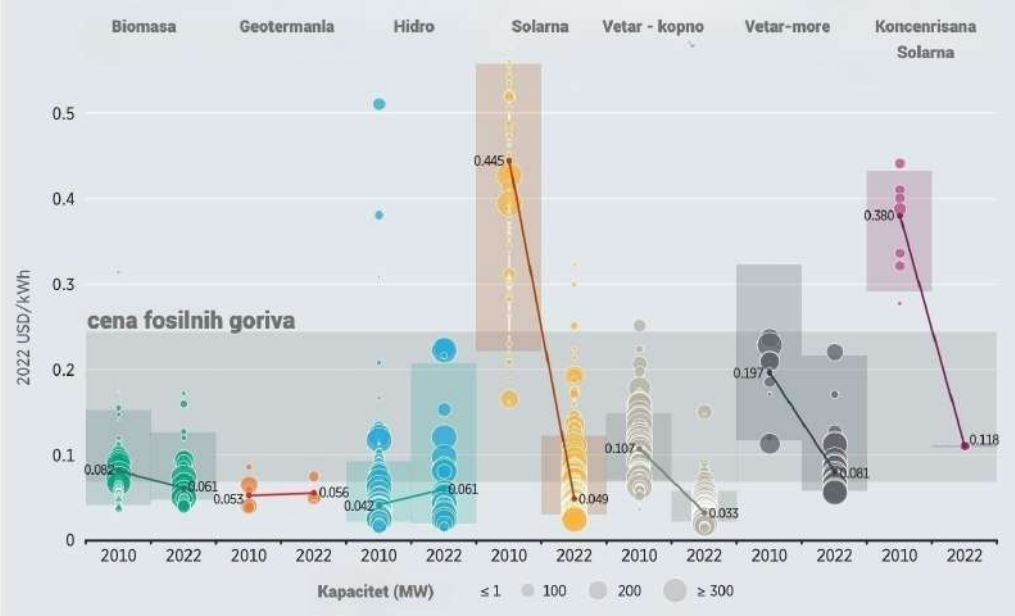


Slika 1.2: Pregled obnovljivih izvora korišćenih za proizvodnju električne energije [4].

cena proizvodnje električne energije po megavatu između 2010. i 2022. godine [7]. Stoga tradicionalne elektroenergetske mreže moraju da se prilagode novoj realnosti u kojoj obnovljivi izvori proizvode sve veći procenat energije. Primarni izazov koji mreže moraju da reše je uticaj vremenskih prilika na proizvodnju energije i inherentna nestabilnost mreže koja se javlja ukoliko veliki procenat energije biva proizveden iz obnovljivih izvora.

1.1.2 Postojeći softverski sistemi za trgovinu energijom i motivacija za istraživanje

Centralizovani softverski sistemi za trgovanje energijom često su deo šireg softverskog rešenja koje pored trgovanja obuhvata predviđanje potrošnje, kontrolu rizika i naplatu energije. Ovakvi sistemi konstantno evaluiraju cenu proizvodnje, potrošačke obrasce i formiraju cenu energije. U nekim slučajevima, krajnji korisnici osećaju razliku u ceni koja je prouzrokovana kratkoročnim promenama na tržištu, dok se u dugim slučajevima energija naplaćuje po konstantnoj ceni. Pri prodaji po konstantnoj ceni, potencijalni gubici prouzrokovani promenama na tržištu energenata ili problemima sa



Slika 1.3: Promena cene proizvodnje energije iz različitih izvora u periodu između 2010. i 2022. godine (preuzeto iz [7]).

infrastrukturom se amortizuju kroz postepena i dugoročna povećanja cene električne energije. Energijom se trguje: dan unapred, tokom dana ili kombinovanjem drugih vremenskih opsega. Zbog nemogućnosti skladištenja električne energije i ograničenja mreže, kompleksnost tržišta za trgovanje energijom je na visokom nivou i ono zahteva kontrolu finansijskog rizika koji može nastupiti u slučaju nepredviđenih spoljašnjih uticaja [8, 9].

Posmatrano sa perspektive softverskih arhitektura, tradicionalni sistemi za trgovanje energijom i upravljanje elektroenergetskim mrežama su često monolitne aplikacije koje su razdvojene u module. Moderniji softverski sistemi su obično razloženi na mikroservise koji izvršavaju funkcionalnosti poput: prikupljanje podataka i prognoziranje, povezivanje sa tržištem, upravljanje rizikom, planiranje potrošnje i računovodstvo. Iako su moderni softverski sistemi arhitektonski razdvojeni na više servisa, centralni izvor istine i kontrola nad servisima su prepušteni malobrojnim subjektima [8, 9]. Ova centralizacija obezbeđuje snažnu mogućnost revizije i jedinstvenu tačku odgovornosti, međutim ona onemogućava krajnjim korisnicima i prozjumerima da imaju značajan uticaj u procesu trgovanja i formiranja cene električne energije.

Posmatrano sa strane korisnika, kupci sa sistemom uglavnom interaguju kroz izbor

ugovora, potrošnju i fakturisanje. Njihovi mereni podaci se validiraju putem sistema za upravljanje podacima sa brojila, nakon čega postaju ulaz u procese poravnanja i fakturisanja. Veleprodajno balansiranje i upravljanje rizikom ostaju interna funkcija elektroprivrede [10]. Ovo razdvajanje odgovornosti gde kupci i prozjumeri samo prihvataju nametnutu cenu, dok elektroprivreda upravlja rizikom i diktira cenu, predstavlja institucionalnu logiku tradicionalnih sistema koja često nije pogodna za male prozjumere.

Primarna motivacija za istraživanje je uviđanje da trenutne softverske arhitekture za trgovinu električnom energijom ne uzimaju u obzir novonastalu distribuiranost elektroenergetskih mreža. Takođe, sistemi za trgovinu električnom energijom [8–10] nisu prilagođeni velikom broju malih proizvođača. Jedna od hipoteza na kojima je postavljeno istraživanje opisano u ovoj disertaciji je da nova softverska arhitektura sistema za podršku trgovanja može biti bolje prilagođena novim uslovima. Sistemi specijalno optimizovani za podršku distribuiranom trgovanju energijom bi dodatno podstakli nove male proizvođače da se priključe mreži, što povećava motivaciju za istraživanje.

Stoga, decentralizovani dizajn predložen u disertaciji nudi drugačiju raspodelu poverenja i softverskih odgovornosti. Centralizovano tržište i centralizovana baza podataka se zamenjuju P2P (engl. Peer-to-Peer) mrežom i distribuiranom glavnom knjigom. Prozjumeri (ili njihovi zastupnici) pružaju kratkoročne ponude u vidu energetskih obećanja nad kojima se vrši aukcijska prodaja ili neki drugi vid poravnanja. Pametni ugovori obezbeđuju kontrolu novca, verifikuju isporuku energije kroz pristup brojilima i obavljaju plaćanje nakon uspešne isporuke. Sve funkcionalnosti se izvršavaju bez centralnog autoriteta ili kriptovalute. Vidljivost podataka ograničena je na strane uključene u transakciju, čime se štiti privatnost svih učesnika u trgovanju. Bitno je naglasiti da predloženi sistem ne nastoji da zameni sve aspekte centralizovanih sistema poput kontrole rizika, predviđanja potrošnje i održavanja stabilnosti mreže. Predloženi softverski sistem teži da kroz decentralizaciju omogući korisnicima više slobode pri trgovanju uz očuvanje tradicionalnih sistema neophodnih za stabilnost mreže. Štaviše, predloženi sistem uvodi ograničenja pri trgovanju i pruža dodatne informacije koje tradicionalni sistemi za upravljanje elektroenergetskim mrežama mogu da iskoriste za bolje planiranje proizvodnje i kontrolu stabilnosti elektroenergetskih mreža.

Dodatno, postojeći softverski sistemi za podršku trgovanju energijom koji uzimaju u obzir distribuiranost sistema koju donose mali izvori trenutno predlažu rešenja koja su često vrlo neefikasna. S toga je jasna potreba i motivacija za istraživanjem koje bi dovelo do predloga i implementacije softverske arhitekture koja bi omogućila efikasan rad u ovakvom novonastalom kontekstu decentralizovanih elektroenergetskih mreža.

1.2 Predmet i ciljevi istraživanja

Predmet istraživanja predstavljenog u ovoj disertaciji su decentralizovani softverski sistemi zasnovani na tehnologiji distribuirane glavne knjige namenjeni za podršku efikasnom trgovanju električnom energijom dobijenom iz obnovljivih izvora. Poseban fokus se stavlja na arhitekture takvih sistema, kao i prednosti i mane koje različite arhitekture donose. Tradicionalni softverski sistemi su uglavnom centralizovani i nisu u mogućnosti da se prilagode naglom porastu distribuiranosti sistema koja se ogleda u povećanom broju malih proizvođača (prozjumera). Sa druge strane, novi sistemi koji predlažu upotrebu distribuiranih tehnologija za trgovanje energijom uglavnom implementiraju arhitekture koje su preuzete iz javnih blokčejn sistema i nisu dovoljno prilagođene slučaju korišćenja kao što su trgovina energijom iz obnovljivih izvora.

Sistemi zasnovani na DLT se generalno smatraju za velike potrošače računarskih resursa i električne energije. Njihova inicijalna namena u softverskim sistemima je bila povećanje bezbednosti i transparentnosti, dok se pomenute tehnologije nisu previše osvrtale na potrošnju resursa. Stoga, pored arhitekture sistema, bitno je uvrstiti performanse DLT sistema za trgovinu energijom iz obnovljivih izvora kao dodatni predmet istraživanja.

Primarni ciljevi istraživanja su (1) predlog arhitekture i tehnologije pogodne za realizaciju decentralizovanog sistema koji se oslanja na distribuiranu glavnu knjigu za podršku trgovanju električnom energijom iz obnovljivih izvora, a potom i (2) testiranje performansi razvijenog sistema i utvrđivanje u kojoj meri je predložena arhitektura pogodna za korišćenje u ovoj oblasti. Merenje performansi je neophodno izvršiti na generički način tako da se razvijena metodologija može proširiti i upotrebiti za testiranje drugih blokčejn i DLT sistema koji se ne koriste za svrhu trgovanja energijom (3).

Decentralizovani sistem koja se predlaže za trgovinu električnom energijom se primarno sastoji od pet ključnih aktera: proizvođači, potrošači, prozjumeri, elektroenergetske kompanije i sistem za upravljanje električnom mrežom. DLT i blokčejn sistemi su P2P mreže u kojima su svi čvorovi međusobno povezani. Ono što se najčešće dešava pri interakciji čvorova u mreži jeste da svaki čvor ima informacije o svakoj transakciji koja se desi na mreži. U slučajevima korišćenja poput trgovine energijom nema potrebe za tolikim stepenom sigurnosti i redundantnosti podataka. Štaviše, nepoželjno je da svaki potrošač ima informacije o tome koliko energije njegove komšije troše ili proizvode. Takođe, nije poželjno da proizvođači energije imaju informaciju o tome koliko električne energije njihovi konkurenti proizvedu i po kojoj ceni je prodaju. Stoga je arhitektura osmišljena tako da samo neophodni akteri učestvuju u različitim tipovima transakcija. Time se:

- smanjuje količina podataka koji se čuvaju u mreži,
- umanjuje mrežni saobraćaj koji je neophodan da bi mreža pravilno funkcionisala,

- smanjuje vreme obrade transakcije,
- povećava privatnost učesnika u mreži.

Performanse osmišljene arhitekture za trgovinu energijom su veoma bitne i mogu se posmatrati iz dva ugla - (1) sposobnosti arhitekture i tehnologije da generiše dovoljan broj transakcija u sekundi i (2) potrošnje resursa. Sistemi za trgovinu električnom energijom mogu biti sačinjeni od velikog broja članova. Ukoliko svi članovi aktivno učestvuju u proizvodnji i potrošnji energije, broj transakcija u takvom sistemu bi lako prevazišao 12 transakcija po sekundi (prosečan broj Itirijum transakcija 2024. godine [11]). Stoga, tehnologija koja bi se koristila za trgovinu energijom ne sme da bude ograničena malim brojem interakcija između malih proizvođača i potrošača energije, već da omogućava slobodnu trgovinu koja se zasniva na velikom broju transakcija.

1.3 Doprinosi teze

Predstavljeno istraživanje donosi doprinose u domenu distribuiranog računarstva, specifično u okviru oblasti distribuirane trgovine električnom energijom. Dodatni doprinos je metodologija za testiranje performansi opisanih sistema za podršku trgovanju, kao i drugih srodnih DLT sistema. Ostvareni su i implementacioni doprinosi u vidu implementacije prototipa sistema za trgovinu energijom iz obnovljivih izvora zasnovanog na primeni Korda DLT tehnologije. Takođe je eksperimentalno pokazano da se predloženi sistem u praksi može koristiti uz značajno manju potrošnju računarskih resursa i energije u odnosu na druge DLT i blokčejn sisteme.
Doprinosi istraživanja predstavljenog u ovoj disertaciji mogu se sumirati na sledeći način:

- Predlog arhitekture softverskog dela sistema za podršku distribuiranom trgovanju električnom energijom proizvedenom prvenstveno iz obnovljivih izvora. Predložena arhitektura doprinosi sigurnosti, distribuiranosti, stabilnosti i energetskoj efikasnosti sistema za trgovanje električnom energijom.
  Prednosti arhitekture:
  - *Distribuiranost predložene arhitekture softverskog sistema za trgovanje* - tradicionalni sistemi za trgovanje električnom energijom su centralizovani i određivanje cene najčešće nije direktno određeno trenutnom ponudom i potražnjom za energijom. Predloženi sistem omogućava određivanje cene energije po principu tendera i daje slobodu korisnicima da trguju energijom bez mešanja centralnog autoriteta koji može uticati na cenu energije.
  - *Kontrola distribucije informacija* - DLT i blokčejn su P2P sistemi koji u opšte slučaju funkcionišu tako što se svi podaci distribuiraju svim članovima mreže i kroz ostvarivanje redundanse podataka ostvaruju povećanu bezbednost i sigurnost podataka. Predložena arhitektura koristi privatne DLT

tehnologiju koja i dalje ostvaruje povećanju bezbednost podataka ali bez širenja informacija svim članovima mreže (samo neophodni učesnici transakcije čuvaju podatke).
  - *Smanjena potrošnja resursa* - merenje performansi nad prototipom predloženog softverskog sistema za podršku trgovanju energijom eksperimentalno je potvrđena niska potrošnja računarskih resursa. U poređenju sa alternativnim popularnim rešenjima koja se oslanjaju na Itirijum tehnologiju, predloženi softverski sistem troši i do 100 puta manje električne energije po transakciji što je takođe eksperimentalno potvrđeno.
  - *Arhitektura koristi postojeću elektroenergetsku mrežu* - arhitektura je osmišljena tako da se oslanja na postojeći elektroenergetski sistem i ne zahteva promene u dizajnu sistema.
- Pregled i analiza aktuelnog stanja u oblasti softverskih sistema za podršku trgovanju električnom energijom.
- Implementacija predloga prototipa distribuiranog softverskog sistema za podršku trgovanju električnom energijom iz obnovljivih izvora. Prototip koristi predloženu arhitekturu i testiran je na virtuelnoj elektroenergetskoj mreži. Prototip se oslanja na postojanje pametnih brojila za merenje potrošnje i na mogućnost dobavljanja podataka o potrošnji u realnom vremenu.
- Pregled i analiza metodologija za merenje performansi DLT i blokčejn sistema.
- Predlog metodologije za merenje performansi predložene arhitekture za trgovanje električnom energijom. Dat je detaljan opis svih koraka i neophodnih automatizacija kako bi proces merenja performansi bio objektivan i vremenski efikasan.
- Eksperimentalna potvrda povoljnih performansi i niske energetske potrošnje predloženog distribuiranog sistema pri radu u uslovima koji su približni očekivanim okolnostima u stvarnosti. Eksperimentalna potvrda je dobijena upotrebom predložene metodologije.
- Skup podataka dobijen prilikom merenja performansi prototipa sistema za trgovinu električnom energijom. Izvedeno je dvanaest eksperimenata, gde je svaki eksperiment ponovljen deset puta radi umanjenja varijanse u merenju performansi. Baza podataka koja sadrži kompletne rezultate merenja potrošnje računarskih resursa kao i električne energije je dostupna na upit.
- Predlog proširenja metodologije za merenje performansi proizvoljnog DLT sistema. Kako je predlog metodologije za merenje performansi sistema za trgovinu električnom energijom smišljeno napravljen da bude što manje vezan za samu prirodu sistema koji se testira, uz nekoliko uopštavanja ona se može iskoristiti za testiranje performansi proizvoljnih DLT i blokčejn sistema.

1.4 Struktura disertacije

U ovoj sekciji dat je kratak pregled preostalih poglavlja disertacije.

Poglavlje 2 opisuje teorijske koncepte relevantne za disertaciju, kao što su distribuirani sistemi, njihove arhitekture i različiti moduli za komunikaciju u P2P mrežama. Zatim se opisuju tehnologija distribuirane glavne knjige, blokčejn tehnologija i razni konsenzus algoritmi koji se koriste u distribuiranim sistemima. Na kraju se opisuju različiti tipovi tehnologija koje se mogu koristiti za razvoj DLT mreža uz osvrt na prednosti i mane svake tehnologije.

U poglavlju 3 su opisani rezultati pretrage relevantne literature iz oblasti primene DLT tehnologije u energetici. Prvenstveno je izvršena analiza preglednih radova sa ciljem određivanja trendova u oblasti. Nakon toga je odrađena široka pretraga publikacija i komercijalnih projekata koja se baziraju na softverskim rešenjima za trgovanje električnom energijom. Analizirane su i postojeće metodologije za merenje performansi DLT sistema kao i metode merenja potrošnje električne energije DLT sistema. Posebna pažnja posvećena je alatima za merenje performansi distribuiranih sistema, uz napomenu da dosta njih ne podržava Kordu, što je razlog za implementaciju prilagođene metodologije u okviru ovog istraživanja.

U poglavlju 4 su opisani elementi predložene distribuirane softverske arhitekture za trgovinu električnom energijom. Detaljno su predstavljeni učesnici sistema (prozjumeri, proizvođači, korisnici, elektroprivreda, mrežno nadzorno telo, verifikacione agencije i trgovci energije), njihove interakcije kao i njihov raspored u distribuiranoj mreži. Poglavlje sadrži i opise ključnih funkcionalnosti kao što su kreiranje energetskih obećanja, licitacije, aukcije i poravnanje transakcija. Opisane su i dodatne funkcionalnosti poput automatizacije trgovine i uvođenja alternativnih metoda trgovine. Poglavlje takođe sadrži korake implementacije prototipa softverskog sistema za trgovinu energijom. Fokus je stavljen na implementaciju robusnog prototipa sa što više opisanih funkcionalnosti kako bi se obezbedilo relevantno eksperimentalno okruženje za testiranje performansi sistema.

U poglavlju 5 su opisani koraci predložene metodologije za merenje performansi razvijenog softverskog sistema. Metodologija uključuje postavljanje eksperimentalnog okruženja, merenje potrošnje resursa i energije, kao i agregaciju i analizu rezultata. Poglavlje objašnjava i kako se metodologija može prilagoditi za testiranje proizvoljnog DLT sistema, uz osvrt na ograničenja kada je reč o merenju performansi javnih blokčejn mreža.

U poglavlju 6 je opisan eksperimentalni proces radi merenja performansi implementiranog prototipa sistema. Opisana su dva eksperimentalna okruženja – testiranje na jednom računaru i na Beovulf klasteru. Detaljno je analizirana potrošnja vremena, memorije i električne energije, kao i karbonski otisak sistema. Eksperimenti su podeljeni u serije, a njihovi rezultati agregirani i analizirani pomoću skripti u Pajtonu i

R-u.

U poglavlju 7 su opisani zaključci disertacije, sumirani doprinosi rada i predlozi za budući rad. Istaknuta je efikasnost predloženog sistema i njegova potencijalna primena u stvarnom svetu, uz naglasak na važnost performansi i nisku potrošnju energije. Dati su i predlozi za dalja istraživanja, uključujući unapređenje arhitekture i metodologije, kao i planovi za testiranje sistema u realnim uslovima.

Poglavlje 2

Teorijske osnove istraživanja

Teorijske osnove istraživanja predstavljenog u ovoj tezi obuhvataju teme potrebne za kompletno razumevanje istraživanja i doprinosa predstavljenih u sadržaju disertacije. U Sekciji 2.1 je dat kratak opis svih ključnih pojmova i koncepata neophodnih za razumevanje distribuiranih sistema. Sekcija 2.2 uvodi koncept distribuirane glavne knjige koja je upotrebljena kao osnovni gradivni element predložene arhitekture za podršku trgovanju energijom. Sekcija 2.3 opisuje Korda tehnologiju koja je korišćena za implementaciju prototipa predložene arhitekture. Sekcija 2.4 opisuje opštu strukturu elektroenergetskih mreža, kao i minimalni skup principa neophodnih za razumevanje softverskog sistema koji pomaže trgovanju energijom.

2.1 Distribuirani sistemi

Distribuirani sistem predstavlja skup nezavisnih računara povezanih mrežom, koji formiraju jedinstven, koherentan sistem iz tačke gledišta njegovog korisnika. Njihova osnovna ideja je da više fizički odvojenih računarskih jedinica zajednički pruža usluge i deli resurse tako da korisnici nemaju svest o tome gde se ti resursi nalaze niti kako su međusobno povezani. Ovakvi sistemi omogućavaju efikasnije korišćenje resursa, veću dostupnost i skalabilnost, ali istovremeno uvode izazove poput sinhronizacije, tolerancije na greške i sigurnosti.

Distribuirani sistemi su po svojoj prirodi složeni, stoga je važno primeniti sistematičan pristup prilikom njihovog proučavanja [12]. Jedan od glavnih doprinosa pomenutoj kompleksnosti jeste to što u distribuiranim sistemima postoji značajan broj eksplicitnih i implicitnih zavisnosti. Na primer, ne postoji potpuno odvojen modul za komunikaciju ili odvojeni bezbednosni modul. Da bi se distribuirani sistemi razumeli, oni se moraju sagledati iz različitih perspektiva. Jedna od glavnih perspektiva je arhitektura sistema. Postoji više načina na koje se distribuirani sistemi mogu organizovati. Arhitektonska perspektiva pomaže pri sticanju perspektive u to kako različite komponente postojećih sistema međusobno komuniciraju i zavise jedna od druge. Neke od perspektiva naglašene u [12] su:

- **Perspektiva procesa** - Distribuirani sistemi se u velikoj meri odnose na procese. Perspektiva procesa tiče se razumevanja različitih oblika procesa koji se javljaju

u distribuiranim sistemima, kao što su: niti, virtuelizacija hardverskih procesa, klijenti, serveri i slično. Procesi čine softversku osnovu distribuiranih sistema, i njihovo razumevanje ključno je za razumevanje samih distribuiranih sistema.

- **Perspektiva komunikacije** - Kada je u pitanju više računara, komunikacija između procesa je od suštinske važnosti. Ova perspektiva se osvrće na mogućnosti koje distribuirani sistemi pružaju za razmenu podataka između procesa. U suštini, reč je o „imitiranju“ poziva procedura na više računara.
- **Perspektiva koordinacije** - Da bi distribuirani sistemi funkcionisali, ono što se dešava „ispod haube“ jeste koordinacija procesa. Procesi se zajednički koordiniraju, na primer, kako bi nadomestili nedostatak globalnog časovnika, obezbedili međusobno isključiv pristup deljenim resursima itd. Perspektiva koordinacije opisuje niz osnovnih koordinacionih zadataka koje je neophodno sprovesti u većini distribuiranih sistema.
- **Perspektiva imenovanja** - Pre pristupanja procesima i resursima potrebno je izvršiti njihovo imenovanje. Konkretno, potrebno je osmisliti šeme imenovanja koje će, kada se primene, zaista dovesti do traženog procesa, resursa ili bilo kog drugog tipa entiteta. Ma koliko to izgledalo jednostavno, imenovanje se ispostavlja kao ključni aspekt u distribuiranim sistemima, a postoje razni načini na koje se ono može uraditi. Perspektiva imenovanja u potpunosti se fokusira na prevođenje imena u pristupnu tačku imenovanog entiteta.
- **Perspektiva konzistentnosti i replikacije** - Kritičan aspekt distribuiranih sistema jeste ostvarivanje dobrih performansi uz održavanje pouzdanosti. Ključni mehanizam za oba aspekta jeste replikacija resursa. Jedan od problema pri replikaciji jeste konstantna potreba za ažuriranjem, odnosno održavanjem svih replika ažurnim. Stoga se ova perspektiva osvrće na kompromise koje je neophodno napraviti između konzistentnosti replikacije i performansi.
- **Perspektiva tolerancije na otkaze** - Distribuirani sistemi su podložni delimičnim otkazima. Stoga je bitno razmatrati načine za prikrivanje otkaza i eventualni oporavak od njih. Pokazalo se da je otpornost na otkaze jedna od najtežih perspektiva za razumevanje u distribuiranim sistemima, prvenstveno zato što postoje brojni kompromisi koje treba napraviti kako bi se ona ostvarila.
- **Perspektiva bezbednosti** - Ovlašćen pristup resursima je ključni aspekt svakog distribuiranog sistema. Stoga je potrebno razmotriti proveru identiteta, kao i distribuciju poverenja u takvim sistemima.

2.1.1 Arhitekture distribuiranih sistema

Organizacija distribuiranih sistema u velikoj meri odnosi se na softverske komponente koje čine sistem. Ove softverske arhitekture ukazuju na to kako treba organizovati različite softverske komponente i na koji način one treba međusobno da komuniciraju.

Uzimajući u obzir da se svaka softverska arhitektura sastoji od komponenti (najčešće nekog tipa procesa) i konekcija, tj. veza između tih komponenata, onda možemo izdvojiti nekoliko ključnih arhitekturalnih stilova, od kojih su prema [12] najbitniji :

- slojevite arhitekture (engl. Layered system architecutes),
- simetrično distribuirane arhitekture (engl. Symmetrically distributed system architetures),
- hibridne arhitekture (engl. Hybrid system architectures).

Slojevite arhitekture

Osnovni primer slojevite arhitekture koji je široko poznat i primenjen u raznim oblastima softvera je prosta klijent-server arhitektura. U ovoj arhitekturi server implementira neku uslugu, dok sa druge strane, klijentski proces želi da koristi uslugu servera. Komunikacija se najčešće dešava putem zahteva koje klijent šalje serveru i čekanja odgovora od strane servera. Prilikom komunikacije između klijenta i servera neophodno je uspostaviti stabilnu komunikaciju kako ne bi došlo do gubljenja poruka. Ukoliko je konekcija sama po sebi stabilna, protokol korišćen za klijent-server komunikaciju može biti veoma prost. Kao alternativu, mnogi klijent-server sistemi koriste pouzdan protokol zasnovan na povezivanju. Iako ovo rešenje nije neophodno za komunikaciju u lokalnoj mreži zbog relativno male šanse za pojavu greške, ono savršeno dobro funkcioniše u široko rasprostranjenim sistemima u kojima je komunikacija po svojoj prirodi nepouzdana. Na primer, praktično svi Internet aplikacioni protokoli zasnovani su na pouzdanim TCP/IP konekcijama. U tom slučaju, svaki put kada klijent zatraži uslugu, prvo uspostavlja vezu sa serverom pre nego što pošalje zahtev. Server tada obično koristi tu istu vezu da pošalje odgovor, nakon čega se veza raskida. Problem može biti u tome što uspostavljanje i raskidanje veze može biti skupo, naročito kada su poruke poslate u zahtevu i odgovoru male.

U ovoj arhitekturi najčešće imamo dva jasno razdvojena uređaja: klijentski i serverski. Postavlja se pitanje rasporeda funkcionalnosti koje se nalaze na kojem uređaju. Najčešće je klijentski uređaj bila samo prosta konzola koja je pozivala serverski uređaj, a sav posao se izvršavao na serverskom uređaju. U mnogim novijim klijent-server okruženjima naročito su popularne organizacije gde je klijentski uređaj običan PC ili radna stanica koja je povezana putem mreže sa distribuiranim fajl sistemom ili bazom podataka. Suštinski, najveći deo aplikacije se izvršava na klijentskom uređaju, dok se sve operacije nad fajlovima ili zapisima u bazi podataka šalju serveru. Na primer, mnoge bankarske aplikacije rade na računaru krajnjeg korisnika, gde korisnik priprema transakcije i slično. Po završetku, aplikacija se povezuje sa bazom na bankarskom serveru i šalje transakcije na dalju obradu.

Simetrično distribuirane arhitekture

Kako je navedeno u [12], simetrično distribuirane arhitekture se sastoje od različitih slojeva (tj. nivoa) koji direktno odgovaraju logičkoj organizaciji aplikacija. U mnogim poslovnim okruženjima, distribuirana obrada je ekvivalentna organizaciji klijent-server aplikacije kao višeslojne arhitekture. Ovakav vid raspodele nazivamo vertikalnom distribucijom. Karakteristična odlika vertikalne distribucije jeste to što se postiže postavljanjem logički različitih komponenti na različite mašine. Pojam je srodan konceptu vertikalne fragmentacije koji se koristi u distribuiranim relacionim bazama podataka, a podrazumeva da se tabele razdvajaju po kolonama i potom raspoređuju na više mašina [13].

Iz ugla upravljanja sistemima, postojanje vertikalne distribucije može biti korisno: funkcije su logički i fizički raspodeljene na više mašina, pri čemu je svaka mašina usmerena na određenu grupu funkcija. Ipak, vertikalna distribucija samo je jedan način organizovanja klijent-server aplikacija. U savremenim arhitekturama, često se javlja i horizontalna distribucija. Kod ove vrste distribucije, klijent ili server mogu biti fizički podeljeni na logički jednake delove, pri čemu se svaki deo bavi sopstvenim segmentom posla i ravnomerno raspoređuje opterećenje. Jedna klasa savremenih sistemskih arhitektura koje podržavaju horizontalnu distribuciju, nazivamo P2P sistemima.

Gledano iz šire perspektive, svi procesi koji čine P2P sistem bi trebali biti ravnopravni. Posledično, većina interakcija između procesa je simetrična: svaki proces istovremeno deluje i kao klijent i kao server. Zbog ove simetrične prirode, P2P arhitekture usredsređene su na pitanje kako organizovati procese u strukturu mreže (engl. network overlay - SM) [14] u kojoj čvorovi predstavljaju procese, a veze označavaju potencijalne komunikacione kanale (često implementirane kao TCP konekcije). Može se dogoditi da čvor ne može direktno komunicirati sa bilo kojim drugim čvorom, već poruke mora slati putem postojećih komunikacionih kanala. Postoje dve vrste SM: strukturisane i nestrukturisane. Obe ove vrste iscrpno su obrađene u radu Lua i saradnika [15], uz brojne primere. U radu [16] je data obimna lista različitih P2P sistema. Aberer i saradnici [17] pružaju referentnu arhitekturu koja omogućava formalnije poređenje različitih tipova P2P sistema, dok se pregled iz ugla distribucije sadržaja sistema nudi u radu [18]. Najzad, Buford i saradnici [19], Tarkoma [14] i Vu i saradnici [20] prevazilaze nivo pregleda i predstavljaju adekvatne udžbenike za dublje proučavanje P2P sistema.

Strukturirane P2P mreže su organizovane u strukturu koja podleže jasno definisanoj topologiji. Neki primeri topologija bi bili: krug, binarno stablo ili mreža. Glavna karakteristika strukturiranih P2P mreža je asocijacija svakog abstraktnog resursa kojim mreža rukuje sa jedinstvenim ključem. I sva indeksiranja u mreži se vrše po tom jedinstvenom ključu. U slučaju gde bi mreža bila zadužena za čuvanje heš

tabele, tj. parova *(ključ, vrednost)*, svaki čvor u takvoj mreži bi na sebi čuvao podskup ključeva koji počinju sa istim nizom znakova i na taj način bi se implementirala distribuirana heš tabela [21]. Ukoliko bi se logika distribuirane heš tabele abstrahovala na P2P mreže, onda bi se moglo reći da se u strukturiranim P2P mrežama optimalno implementira funkcija pretrage čvora u mreži na osnovu ključa. U tom slučaju, topologija mreže igra veoma bitnu ulogu. Svaki čvor u mreži bi trebao, na osnovu ključa, da izvrši rutiranje algoritma za pretragu sve dok se ne pronađe konkretan čvor koji se traži.

Dok strukturirane P2P mreže teže da održe determinističku topologiju mreže, u **nestrukturiranim P2P mrežama** svaki čvor sadrži nasumičnu listu svojih komšija. Kao rezultat se dobija struktura koja oslikava nasumični graf u kojem grana ⟨u,v⟩ između čvora u i v postoji sa određenom verovatnoćom P[⟨u,v⟩]. U nestrukturiranim mrežama, prilikom priključivanja čvora u mrežu najčešće mu se dodeljuje lista dobro poznatih čvorova mreže. Ova inicijalna lista se kasnije koristi kako bi se otkrili novi čvorovi u mreži. U praksi se lista komšija koju čvor čuva gotovo konstantno menja. Ukoliko čvor primeti da komšijski čvor nije dostupan, on ga može zameniti nekim drugim čvorom.

Za razliku od strukturiranih P2P mreža gde algoritam za tražanje podataka u mreži prati predefinisanu putanju, u nestrukturiranim mrežama je neophodno izvršiti pretragu kako bi se pronašli podaci [22]. Postoje dva algoritma koja se mogu koristiti za pretragu, a to su plavljenje (engl. flooding) i nasumična šetnja (engl. random walks). Prilikom pretrage podataka upotrebom **plavljenja**, svaki čvor prosto prosledi parametre pretrage svim svojim komšijama. U slučaju da je čvor ponovo primio isti zahtev, on ga ignoriše. U momentu kada čvor koji poseduje tražene podatke dobije zahtev, on može poslati odgovor direktno čvoru koji je poslao inicijalni zahtev, ili može poslati odgovor čvoru koji je njemu poslao upit, a taj čvor ima zadatak da dalje prosledi podatke kroz mrežu sve dok oni ne stignu do originalnog čvora koji je poslao zahtev. Očigledno je da ovakav tip pretrage zahteva mnogo resursa, tako da se radi očuvanja stabilnosti mreže uz njega najčešće šalje i vremenski period u kom zahtev važi. Nakon isteka tog perioda, ukoliko podatak nije pronađen, zahtev se proglašava nevalidnim i potraga prestaje. Sa druge strane, algoritam **nasumične šetnje** vrši pretragu podataka uz pravilo da jedan čvor može proslediti zahtev samo jednom od komšija koji se nasumično bira (odatle i naziv algoritma). Opis ovog algoritma je predstavljen u [23, 24]. Algoritam nasumične šetnje troši značajno manje resursa i ne postoji opasnost da će preplaviti mrežu zahtevima, ali najčešće zahteva mnogo duži vremenski period pre nego što pronađe traženi podatak. U cilju smanjenja vremena neophodnog da se algoritam uspešno završi, moguće je pokrenuti nekoliko paralelnih nasumičnih šetnji i tako balansirati između opterećenja mreže i vremena neophodnog da algoritam pronađe podatke.

Pored strukturiranih i nestrukturiranih simetrično distribuiranih P2P mreža mogu se izdvojiti i **hijerarhijski organizovane** mreže. U nestrukturiranim mrežama je već pomenut problem pretrage podataka i što takve mreže postaju veće, to i ovaj problem postaje izraženiji. Jedini način da čvor u nestrukturiranoj mreži vrši pretragu jeste da preplavi mrežu i da pošalje zahtev svojim komšijama. Alternativa bi bila postojanje posebnih čvorova koji poseduju indeks podataka koji se nalaze na čvorovima razbacanim u distribuiranoj mreži. Čvorovi koji sadrže indeks podataka se često nazivaju i superčvorovi. Superčvorovi su često takođe organizovani u P2P mrežu koja dovodi do hijerarhijske strukture cele mreže u kojoj su superčvorovi bitniji od ostalih čvorova [25]. Vrlo često je postojanje jake sprege između superčvorova i običnih čvorova. Kada se običan čvor pridruži mreži, on se dodeljuje superčvoru koji održava indeks njegovih podataka sve dok je običan čvor deo mreže. Pomenute uloge superčvorova impliciraju da oni moraju imati visok stepen pristupa i njihovim otkazivanjem se narušava hijerarhijska struktura mreže.

Imati fiksnu vezu običnog čvora sa superčvorom ne mora uvek biti najbolje rešenje. Na primer, u slučaju mreža za deljenje fajlova, može biti korisnije da se slabiji čvor poveže sa superčvorom koji održava indeks fajlova za koje je slabiji čvor trenutno zainteresovan. U tom slučaju, veće su šanse da će, kada slabiji čvor traži određeni fajl, njegov superčvor znati gde može da ga pronađe. Garbacki i saradnici [26] opisuju relativno jednostavnu šemu u kojoj veza između slabog i jakog čvora može da se menja kako slabi čvorovi otkrivaju bolje superčvorove za povezivanje. Konkretno, superčvor koji vrati rezultat pretrage dobija prednost u odnosu na ostale superčvorove. Kao što smo videli do sada, P2P mreže nude fleksibilne načine na koje se čvorovi mogu priključiti ili napustiti mrežu. Međutim, kod mreža koje imaju superčvorove postavlja se pitanje odabira čvorova koji ispunjavaju uslove da postanu superčvorovi. Ovaj problem je blisko povezan sa problemom izbora lidera i koncepta konsenzus algoritama koji će biti obrađeni u daljem tekstu.

Najbolji primer hijerarhijski organizovanih mreža bio bi veoma poznati sistem za deljenje fajlova Bittorent (engl. BitTorrent) [27]. Detaljno obrađivanje ovog sistema izlazi van opsega disertacije, međutim, predlaže se njegovo dalje istraživanje u cilju bolje razumevanja praktične primene P2P mreža.

Hibridne arhitekture

Distribuirani sistemi u stvarnom svetu su složeni zato što kombinuju mnoštvo arhitektura: centralizovane funkcionalnosti se kombinuju sa P2P karakteristikama, koje se zatim kombinuju sa hijerarhijskim organizacijama itd. Ovu složenost dodatno povećava činjenica da mnogi distribuirani sistemi prevazilaze ograničenja jednog entiteta koji ih održava, što dovodi do istinski decentralizovanih rešenja u kojima nijedna pojedinačna organizacija ne može preuzeti odgovornost za funkcionisanje sistema.

Stoga su najčešće praktično korišćene distribuirane arhitekture zapravo hibridne arhitekture. Najpopularniji sistemi koji implementiraju hibridne P2P arhitekture su računarski sistemi u oblaku (engl. cloud computing systems) i za nas ključni DLT i blokčejn sistemi kojima će biti posvećen ostatak sekcije.

2.2 Tehnologija distribuirane glavne knjige (DLT) i blokčejn

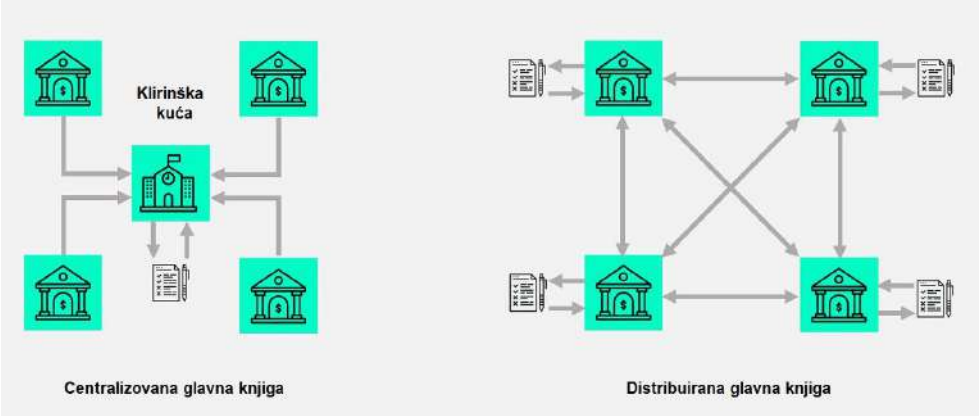
Vrlo često dolazi do zabune kada su koncepti distribuirane glavne knjige i blokčejna u pitanju. Ova dva pojma se često mešaju ili poistovećuju, tako da će u ovoj sekciji oba pojma biti objašnjena.

Dvojno knjigovodstvo (engl. double entry bookkeeping) je metod koji se koristi u poslovanju, a koji je dobio ime po tome što svaki upis na jedan račun prati odgovarajući i suprotan upis na drugi račun. Dvojni unos ima dve jednake korespodentne strane, a to su dugovanje i potraživanje, odnosno debit i kredit. Koristeći ovaj sistem, osiguravamo da nema gubitka sredstava u sistemu i smanjujemo mogućnost da dođe do prevare. Sledeći važan pojam je glavna knjiga (engl. ledger) koja služi za beleženje i sumiranje ekonomskih transakcija u računovodstvu. Dugovanja i potraživanja se nalaze u posebnim kolonama, kao i početno i krajnje stanje dva računa. Transakcije se upisuju u glavnu knjigu zajedno sa datumom i vremenom, tako da u glavnoj knjizi postoji nedvosmislen skup svih transakcija.

Svi definisani pojmovi se odnose na centralizovane sisteme, stoga je neophodno objasniti pojam distribuirane glavne knjige tako što na definiciju glavne knjige dodajemo još princip distribuiranosti. Distribuiranost u ovom smislu je veoma slična distribuiranosti koja se sreće kod baza podataka. Suština je to da su podaci koji su ranije bili čuvani na jednom mestu, sada raspoređeni na više fizičkih mašina. Time se ubrza pristup podacima uz cenu povećane kompleksnosti komunikacije, i što je u DLT sistemima mnogo bitnije, povećava se sigurnost (posledica veće redundase podataka i pravila za izmenu podataka). Distribuirana glavna knjiga je vrsta distribuirane baze podataka koja pretpostavlja moguće prisustvo malicioznih korisnika (čvorova). DLT takođe implementira strukturu podataka koja omogućava pamćenje transakcija koje su razmeštene na više čvorova (fizičkih mašina). Ključno je da su čvorovi povezani u P2P mrežu gde svaki čvor sadrži identičnu repliku glavne knjige. Takođe, svaki čvor samostalno osvežava svoje podatke, tj. kopiju glavne knjige. Centralizovane glavne knjige imaju regulatorno telo koje je zaduženo za validaciju transakcija i ima isključivo pravo menjanja glavne knjige (videti Sliku 2.1). Za razliku od centralizovane glavne knjige, kod distribuirane glavne knjige svaki čvor može da upiše novu transakciju i zatim ostali čvorovi glasaju kroz konsenzus algoritam o tome da li je nova transakcija validna. U trenutku kada je konsenzus postignut, svi čvorovi upisuju

novu validnu verziju glavne knjige. Kada se podaci upišu u distribuiranu glavnu knjigu, dobijamo distribuiranu bazu podataka čije stanje se može menjati isključivo postizanjem konsenzusa. Takva baza je kontrolisana od strane svih članova mreže kroz pravila koja postoje u njihovoj komunikaciji, tj. pomenuti konsenzus algoritam.

Dok su centralizovane glavne knjige sklone sajber napadima, distribuirane knjige su inherentno teže za napad jer sve distribuirane kopije (ili njihova većina) moraju biti napadnute istovremeno da bi napad bio uspešan. U najvećem broju slučajeva broj čvorova koje je potrebno korumpirati da bi cela mreža bila napadnuta je 1/3. Međutim, ovaj broj varira u odnosu na to koji konsenzus algoritam se koristi radi očuvanja konzistentnosti mreže. Dakle, činjenica da podaci upisani u glavnoj knjizi ne mogu biti izmenjeni od strane jednog člana mreže donosi dodatnu sigurnost čitavom sistemu.



Slika 2.1: Centralizovana i distribuirana glavna knjiga.

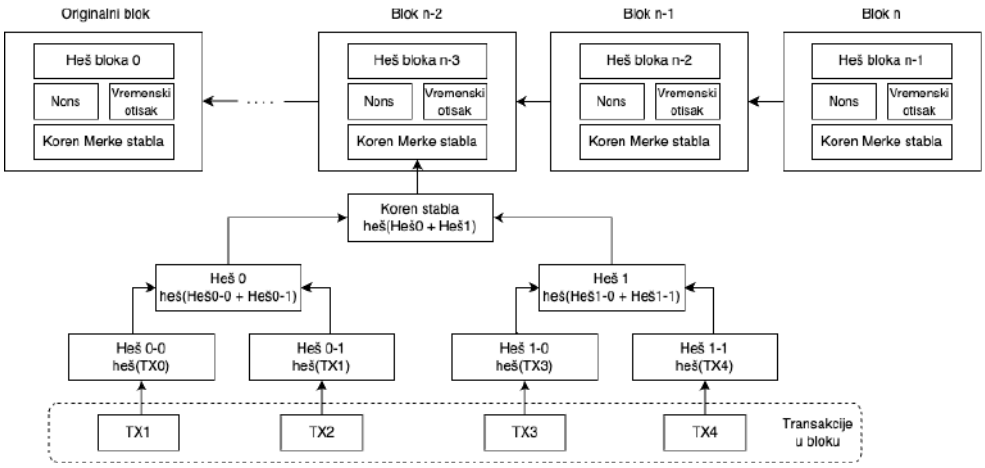
DLT tehnologija sastoji se od tri glavne komponente:

- Modela podataka (engl. data model) koji obuhvata način na koji se podaci skladište na svakom čvoru.
- Jezika transakcije (engl. language of transactions) koga koriste svi čvorovi u mreži kako bi međusobno komunicirali, tj. kako bi promenili stanje u kome se nalazi glavna knjiga.
- Protokola (engl. protocol) koji se koristi kako bi se među učesnicima u distribuiranom sistemu postigao konsenzus o tome koje će transakcije biti prihvaćene i u kom redosledu upisane u glavnu knjigu.

Blokčejn je specifična linearna distribuirana struktura podataka koja implementira distribuiranu glavnu knjigu. Blokčejn je sastavljen od lanca kriptografski povezanih blokova koji sadrže grupe transakcija. On se proširuje novim blokovima koji predstavl-

jaju dodavanje novih transakcija u bazu. Blokovi se mogu verifikovati od strane mreže korišćenjem kriptografskih metoda (heš algoritama). Pored transakcija, svaki blok sadrži vremenski otisak (engl. timestamp), heš vrednost prethodnog bloka (roditelja) i nons (engl. nonce), koji je nasumičan broj za verifikaciju heša (videti Sliku 2.2). Ovaj koncept obezbeđuje integritet čitavog blokčejna sve od prvog bloka (engl. genesis blok). Blokčejn se oslanja na karakteristike heš funkcije kao što su: mala promena ulaza u heš funkciju u potpunosti menja izlaz i nije moguće dobiti ulaznu vrednost na osnovu vrednosti izlaza heš funkcije. Heš vrednosti su takođe jedinstvene, stoga se prevara može efikasno sprečiti jer bi promena bilo kog bloka u lancu odmah promenila odgovarajuću heš vrednost. Na Slici 2.2 se vidi kako blok *n-1* u sebi sadrži heširanu vrednost bloka *n-2*. U slučaju promene bilo koje vrednosti u bloku *n-2* validacija svih blokova posle njega bi kroz heširanje davala pogrešnu vrednost (razlikovala bi se od heširane vrednosti sačuvane u ostalim blokovima) i od tog momenta lanac blokova bi bio nevalidan ("pokidan").

Na Slici 2.2 se jasno vidi lanac blokova po kome je blokčejn i dobio ime. Međutim, lanac se najčešće ne konstruiše od punih blokova koji sadrže sve transakcije, već se koriste samo zaglavlja blokova. Stoga je Merkle stablo (ili neko drugo heš stablo) takođe ključni koncept povezan sa blokčejn tehnologijom. Blokovi u sebi često sadrže veliki broj transakcija, i koren Merkle stabla predstavlja njihov uprošćen prikaz. Koren stabla se koristi u cilju potvrde očuvanja validnosti podataka koji se nalaze u bloku. Listovi stabla su same transakcije koje se nalaze u bloku. Svaki čvor iznad listova se formira heširanjem čvorova koji se nalaze ispod njega. Inicijalno se heširaju same transakcije, a kasnije se dve prethodne heš vrednosti koriste kao ulaz u heš funkciju kako bi se formirala nova grana stabla (videti Sliku 2.2). Rezultat svih heširanja je koren Merkle stabla koji predstavlja sve transakcije. U slučaju da neki učesnik mreže želi da validira ispravnost transakcija u mreži, on bi iznova formirao Merkle stablo i uporedio dobijeni heš sa hešom koji se nalazi u lancu zaglavlja blokova. Ukoliko je bilo koja vrednost u bilo kojoj transakciji promenjena, dobijeni heš će se u potpunosti razlikovati od heša koji se nalazi u zaglavlju bloka i može se utvrditi da transakcije nisu validne, tj. da im je vrednost izmenjena.



Slika 2.2: Lanac blokova

Pametni ugovori su takođe koncept koji se povezuje sa DLT i blokčejn tehnologijom i njen su ključni deo. Sabo je uveo koncept pametnih ugovora [28] (engl. smart contracts) i definiše ih kao kombinaciju protokola i korisničkog interfejsa. Njihova svrha je da formalizuju i osiguravaju odnose preko računarskih mreža. Drugim rečima, to su digitalni mehanizmi koji automatizuju dogovore koristeći tehnologiju i mogu se upotrebljavati kao alternativa tradicionalnom pravnom autoritetu. Zahvaljujući blokčejnu, pametni ugovori postaju sve popularniji jer se mogu mnogo lakše koristiti primenom blokčejna u poređenju sa tehnologijom dostupnom u vreme kada su izmišljeni. Ovaj inovativni pristup može, u određenoj meri zameniti advokate i banke koje su do sada bile uključene u ugovore o prometu imovine zasnovane na unapred definisanim uslovima [29]. Pametni ugovori se takođe mogu koristiti za upravljanje vlasništvom nad imovinom. Ta imovina može biti opipljiva (npr. kuće, automobili) ili neopipljiva (npr. akcije, prava pristupa ili kriptovalute).

Istaknuti primer blokčejn tehnologije koji ozbiljno razvio i implementirao koncept pametnog ugovora je Itirijum, decentralizovani sistem koji je prvobitno predložio Buterin [30]. Itirijum se može posmatrati kao proširenje Bitkoin blokčejna koje podržava širi spektar aplikacija u odnosu na Bitkoin (praktično se koristi isključivo kao kriptovaluta). Dakle, blokčejn tehnologija omogućava sklapanje ugovora putem kriptografije i zamenu verifikacionih kuća i notara koje su bile potrebne za uspostavljanje poverenja u prošlosti. Blokčejn bi mogao da izmeni ceo proces trgovine automatizovanim izvršavanjem ugovora na ekonomičan, transparentan i siguran način.

Finansijska industrija je u procesu istraživanja upotrebe DLT i blokčejn tehnologije. Značajni delovi njihovog trenutnog poslovanja mogli bi biti zamenjeni blokčejnom

i pametnim ugovorima (primer bi bio proces plaćanja). Prilikom plaćanja robe kreditnom karticom, konačna obrada transakcije se dešava tek nakon nekoliko dana. Korišćenjem DLT-a, ovo kašnjenje bi postalo suvišno jer bi se plaćanje moglo izvršiti u realnom vremenu (ili uz malo zakašnjenje) jednostavnim ažuriranjem knjige transakcija.

Glavna razlika između blokčejna i drugih distribuiranih baza podataka je u tome što je blokčejn projektovan kako bi se postigao konzistentan i pouzdan dogovor o zapisu događaja (npr. „ko je vlasnik čega") između nezavisnih učesnika koji mogu imati različite motivacije i ciljeve [31]. Kao kod DLT, i kod blokčejn mreža korisnici postižu konsenzus o promenama stanja deljene baze podataka (tj. transakcijama između učesnika) bez potrebe da se veruje u integritet bilo kog učesnika mreže ili administratora. Takav dogovor o stanju baze se postiže kroz mehanizme konsenzusa. Oni osiguravaju da svaki učesnik mreže ima isto stanje distribuirane baze podataka.

Ono što blokčejn čini specifičnim i popularnim je što kroz kombinaciju konsenzus mehanizama i specifične strukture podataka on uspešno rešava **problem dvostruke potrošnje** (engl. double spending problem). Srž problema dvostruke potrošnje je što u digitalnim sistemima fajl lako može da se kopira i falsifikuje, za razliku od fizičkih sistema gde su takve akcije mnogo teže ostvarive.

Spomenute prednosti blokčejn tehnologije omogućavaju prenos digitalnih dobara bez potrebe za centralizovanim autoritetom kom svi moraju verovati. Ukidanje treće strane kao centralizovanog administratora donosi mnoge prednosti. Učesnici mogu individualno i samostalno da provere da li je ono što se nalazi u njihovoj kopiji baze jednako onome što se nalazi u kopijama drugih učesnika u mreži. To osigurava da svi učesnici imaju konzistentan pogled na podatke koji se nalaze u zajedničkoj bazi. Sve pomenute činjenice ukazuju na to da će se bilo koja nevalidna promena baze odbaciti od strane svih drugih članova mreže, i na taj način očuvati validnost podataka u bazi [32].

DLT sistemi, pored raznih prednosti, imaju i mane, od kojih bi se mogle izdvojiti smanjenje performansi u odnosu na centralizovane sisteme, kompleksnost održavanja i veća potrošnja resursa. DLT sistemi se sastoje od više uređaja koji se često nalaze na različitim geografskim lokacijama. Stoga, pri radu ovakvih sistema, mora se uračunati i dodatno vreme za komunikaciju između udaljenih uređaja i sve komplikacije koje mrežna komunikacija donosi. Dodatno, svaki uređaj poseduje i sopstvenu bazu podataka koju je neophodno asinhrono ažurirati kako bi oslikavala stanje koje se nalazi u bazama ostalih uređaja u mreži. Time se značajno povećava redundansu podataka, što povećava i potrošnju računarskih resursa neophodnih za normalno funkcionisanje distribuiranog sistema.

U pogledu operacija za upis i ispis, DLT-ovi se mogu podeliti u četiri klase. Čitanje podataka iz distribuirane glavne knjige može biti javno ili privatno, dok upis u

distribuiranu glavnu knjigu ponekad zahteva posebnu dozvolu, a ponekad je dozvoljen svima. Ovo nas dovodi do četiri vrste DLT-ova: javni bez pravila pristupanja, privatni bez pravila pristupanja, javni sa pravilima pristupanja i privatni sa pravilima pristupanja. Dva od četiri se nalaze u upotrebi u realnim aplikacijama. Prva vrsta sa praktičnom primenom je javni DLT bez prava pristupa, kao što su Bitkoin [31, 33] i Itirijum [30, 33]. Ova vrsta DLT-a je najčešće korišćena kao baza za kriptovalute i pruža dozu anonimnosti svojim korisnicima. Druga vrsta je privatni DLT sa pravom pristupa [34–37] koji se najčešće koristi u poslovnom kontekstu. Kada se uporede sa svojim javnim pandanima, privatni DLT-ovi sa pravom pristupa nude bolje upravljanje pravima pristupa podacima, veću privatnost, veći protok transakcija, bolju skalabilnost i veću modularnost. Sve pomenute prednosti privatne DLT mreže nude se u zamenu za zahtev od korisnika da izvrši autentifikaciju i autorizaciju. Najpopularniji predstavnici privatnih DLT-ova sa pravom pristupa su Hajperledžer Febrik [37] i R3 Corda [36]. Bitno je naglasiti da R3 Korda jeste DLT, ali nije blokčejn zato što radi čitanje i pisanje transakcija u bazu na nivou svake pojedinačne transakcije, za razliku od Fabric-a koji upisuje transakcije u blokovima.

2.2.1 Konsenzus algoritmi

Prema Svonsonu [38] konsenzus mehanizam kod DLT je proces u kome većina (ili u nekim slučajevima svi) validatori u mreži dolaze do dogovora o stanju distribuirane glavne knjige. To je skup pravila i procedura koje omogućavaju održavanje koherentnog skupa činjenica među više učesnika u mreži. Zbog toga se nove transakcije ne dodaju automatski u knjigu. Umesto toga, proces konsenzusa obezbeđuje da se transakcije čuvaju u bloku određeno vreme (npr. oko 10 minuta kod Bitkoina) pre nego što budu finalno upisane u distribuiranu glavnu knjigu. Nakon toga, informacije u blokčejnu se više ne mogu menjati. U slučaju Bitkoina, blokove kreiraju takozvani rudari (engl. miners) koji dobijaju nagradu u Bitkoinu za validaciju blokova i koristi se PoW (engl. Proof of Work) algoritam. Slični mehanizmi se koriste i u Itirijumu i drugim mrežama, samo uz upotrebu drugih konsenzus algoritama kao što je PoS (engl. Proof of Stake). Detaljnije objašnjenje konsenzus algoritama će biti dato u nastavku ove podsekcije.

Glavna uloga konsenzus algoritma u distribuiranom sistemu je pružanje otpornosti na otkaze. Otkazi od kojih bi sistem automatski trebao da se oporavi bi se mogli svesti u dve grube kategorije: otkazi usled pada i proizvoljni otkazi. **Otkazi usled pada** su lakši za obradu i svode se na dodelu specijalne uloge čvora, koji više nije dostupan, nekom drugom dostupnom čvoru u mreži. Proces dodele uloge drugom čvoru se najčešće dešava kroz neki vid glasanja. Reprezentativni algoritam za oporavak od otkaza je algoritam Raft.

Paksos (engl. Paxos) konsenzus algoritam [39] predstavlja jedan od prvih formalno definisanih pristupa za postizanje saglasnosti u distribuiranim sistemima u kojima

čvorovi mogu otkazati. Predstavio ga je Lamport 1998. godine kao matematički rigorozan model kojim se garantuje da svi ispravni čvorovi donose istu odluku čak i u prisustvu delimičnih otkaza. Osnovna ideja algoritma zasniva se na fazama predlaganja, prihvatanja i potvrđivanja vrednosti, čime se obezbeđuje jedinstven redosled odluka u sistemu. Iako je Paxos visoko pouzdan i teoretski dokazan, njegova složena formalizacija i teškoće u praktičnoj implementaciji podstakle su razvoj jednostavnijih konsenzus algoritama, kao što je Raft.

Raft konsenzus algoritam [40] je osmišljen 2014. godine kao razumnija alternativa Paksos algoritmu [39]. On je dizajniran da održava replicirane replike podataka koje se prostiru na mnogo različitih servera i osigura: otpornost na otkaze, konzistentnost i lakoću razumevanja. Za razliku od Paksosa, Raft je značajno jednostavniji za implementaciju u distribuiranim sistemima. Ključni problem koji Raft rešava je održavanje identične replike podataka na više čvorova u distribuiranoj mreži uz pružanje otpornosti na otkaze pojedinačnih čvorova.

Raft problem postizanja konsenzusa deli na tri podproblema: izbor lidera, replikacija podataka i sigurnost. U jednom trenutku se samo jedan čvor može posmatrati kao lider, dok su ostali sledbenici. Lider je zadužen za prihvatanje korisničkih zahteva i njihovo smeštanje u distribuiranu bazu podataka ostalih sledbenika. Sledbenici odgovaraju na zahteve lidera i repliciraju podatke koje on šalje u svojim bazama podataka. Izbor lidera se dešava u slučaju da trenutni čvor lidera prestane da funkcioniše. Ukoliko sledbenik prestane da dobija redovne poruke od lidera kojima on obaveštava sledbenike da normalno funkcioniše, on nakon unapred predefinisanog vremena pokrene glasanje za novog lidera i predloži sebe kao kandidata. Ukoliko kandidat dobije većinski broj glasova od svih sledbenika, on postaje novi lider. Nakon izbora novog lidera, lider šalje poruke ostalim članovima mreže da je glasanje završeno i mreža se vraća u normalni režim rada.

Replikacija podataka pri upotrebi Raft konsenzus algoritma je prilično jednostavna. Lider prihvata klijentske zahteve, sačuva potrebne podatke i obavesti sledbenike o novoj poruci. Sledbenici obrade poruku od lidera i odgovaraju da prihvataju podatke. Nakon što je većina sledbenika prihvatila podatke, oni se uspešno upisuju u distribuiranu bazu. Opisani proces garantuje konzistentnost podataka tj. osigurava da neće doći do razlike između baza podataka koje se nalaze kao deo svakog čvora sledbenika. Kroz separaciju uloga Raft uprošćava proces postizanja konsenzusa u distribuiranom sistemu i zbog toga je često korišćen u produkcionim sistemima.

Konsenzus algoritmi otporni na proizvoljne otkaze su komplikovaniji u odnosu na algoritme za oporavak od otkaza usled pada. Proizvoljni otkaz čvora se može svrstati u istu grupu sa malicioznim čvorom, tj. čvorom koji aktivno teži da onemogući pravilno funkcionisanje mreže ili podmetne nevalidne podatke. Stoga su konsenzus algoritmi otporni na proizvoljne otkaze najčešće korišćeni u javnim DLT i

blokčejn mrežama u kojim proizvoljni učesnici mogu da se pridruže mreži. Ovi činioci su najčešće potpuno anonimni, stoga se radi bezbednosti mora pretpostaviti da će neki od njih biti maliciozni. Kao reprezentativni algoritam ove grupe bi se mogao izabrati PBFT (engl. Practical Byzantine Fault Tolerance). Međutim, u svetu DLT i blokčejn tehnologije svakako najčešće korišćeni algoritmi su PoW (engl. Proof of Work) i PoS (engl. Proof of Stake). Sabiranjem količine novca koja je osigurana upotrebom PoW i PoS algoritama, vrlo brzo postaje jasno da su ovi algoritmi veoma sigurni i testirani u produkciji. Njihova upotreba od strane najpopularnijih blokčejn mreža dovodi do toga da su ogromne količine raznih digitalnih dobara osigurane njihovom upotrebom. To daje snažnu inicijativu malicioznim učesnicima da pronađu greške u njihovim protokolima i ostvare veliku materijalnu korist. Činjenica da se ovo nije dogodilo na velikom nivou do sada govori o pouzdanosti ovih algoritama.

PBFT (engl. Practical Byzantine Fault Tolerance) je konsenzus algoritam koji je osmišljen pri rešavanju problema Vizantijskih generala [41]. On se koristi kako bi se postigao dogovor između čvorova u distribuiranoj mreži u kojoj neki od čvorova mogu biti maliciozni. Mreža se sastoji od grupe čvorova koji se nazivaju replike. Svaka replika poseduje identične podatke i one zajedno čine distribuiranu bazu podataka. Jedna replika se proglašava za primarnu i predstavlja lidera. PBFT može pravilno da funkcioniše sa maksimalnim brojem od f malicioznih čvorova sve dok je ukupan broj čvorova u mreži $3f+1$. Dakle, da bi mreža mogla da toleriše jedan maliciozni čvor, potrebno je da ima bar 4 ispravna čvora.

Klijenti šalju zahteve čvoru lidera koji nakon toga pokreće konsenzus algoritam. Proces postizanja konsenzusa pri upotrebi PBFT algoritma nije trivialan, sastoji se od pet faza i zahteva dosta komunikacije između čvorova. Uprošćenje faze algoritma su:

- Faza obrade klijentskog zahteva - lider prihvata klijentski zahtev i započinje transakciju.
- Faza pred-pripreme - u ovoj fazi lider potpisuje poruku i šalje je ostalim replikama koje proveravaju validnosti potpisa.
- Faza pripreme - nakon uspešne validacije poruke pred-pripreme, svaka replika generiše poruku pripreme i šalje je svim ostalim replikama. Svaka replika takođe skuplja poruke od ostalih replika. Ukoliko replika prikupi $2n/3 + 1$ poruka (gde je n ukupan broj čvorova u mreži), prelazi na sledeci korak.
- Faza potrvde - kada jedna replika sakupi dovoljno poruka pripreme, ona pošalje poruku potvrde. Sve replike skupljaju poruke potvrde, uključujući i sopstvenu. Ukoliko replika skupi $2n/3+1$ poruka potvrde, ona upisuje dobijene podatke u svoju bazu.
- Faza odgovora klijentu - svaka replika nakon upisa podataka u lokalnu bazu direktno obaveštava klijenta o tome. Ukoliko klijent prikupi obaveštenja od bar

$2n/3+1$ replika može smatrati da je transakcija uspešno izvršena.

Na osnovu opisanog procesa prihvatanja transakcije, jasno je da PBFT zahteva slanje velikog broja poruka između replika (čvorova u mreži) kako bi se ispunio jedan korisnički zahtev. Kominikaciona kompleksnost algoritma kvadratno skalira ($O(n^2)$), i to ograničava upotrebu algoritma na većim distribuiranim mrežama. Mreže čiji broj čvorova prevazilazi 100 su već smatrane prevelikim za upotrebu PBFT algoritma. Dodatno, algoritam zahteva unapred poznat i fiksni skup čvorova koji učestvuju u komunikaciji. Dva pomenuta svojstva algoritma ograničavaju njegovu upotrebu u javnim blokčejn mrežama zato što one podrazumevaju da bilo ko u bilo kom trenutku može da se priključi mreži i u opštem slučaju poseduju broj čvorova koji je značajno veći od 100. Sa druge strane, prednost PBFT algoritma je što poruke bivaju prihvaćene u momentu kada se postigne konsenzus i nije ih moguće kasnije promeniti. Kvaliteti i ograničenja algoritma utiču na to da se on najčešće koristi u privatnim blokčejn mrežama sa ograničenjem pristupa poput Hajperledžer Febrika [37].

PoW je popularizovan od strane Bitkoina i u srži predstavlja rešavanje računarski kompleksnog problema od strane čvorova u mreži koji se zovu rudari (engl. miners). Prvi čvor koji reši problem dobija pravo da doda novi blok u lanac i za to dobija nagradu. Problem koji čvorovi rešavaju je računanje kriptografskih heš funkcija sa ciljem pronalaska heša koji zadovoljava određene kriterijume (npr. heš koji sadrži određeni broj nula na početku). Pronalazak takvog heša zahteva ponovno izvršavanje heš funkcije mnogo puta uz promenu nons vrednosti (nasumična vrednost) koja se nalazi u zaglavlju bloka. Kako su najbitnije karakteristike heš funkcije da mala promena ulaza prouzrokuje veliku promenu izlaza, i da nije moguće predvideti izlaz funkcije na osnovu ulaza, zaključak je da je neophodno izvršiti ogroman broj izvršavanja heš funkcije sve dok se nasumično ne pronađe nons vrednost koja u kombinaciji sa zaglavljem bloka ne proizvede heš koji zadovoljava postavljene kriterijume.

U momentu kada rudar pronađe odgovarajući heš, on dodaje novi blok u mrežu i javlja ostalim članovima u mreži da je blok pronađen. Svi čvorovi provere ispravnost dobijene heš funkcije pre nego što prihvate novi blok. Ta provera zahteva izvršavanje samo jedne heš funkcije, što zahteva malo računarskih resursa. Međutim, u distribuiranoj mreži u kojoj se mnogo rudara takmiči u proizvodnji novog bloka, može se desiti da dva čvora u različitim delovima mreže u približno isto vreme pronađu odgovarajući heš i ostvare uslov da proizvedu novi blok. U tom slučaju u mreži kratkotrajno postoje dva paralelna validna lanca. Nakon pronalaska sledećeg bloka, rudar će se morati odlučiti na koji od dva lanca će dodati svoj blok. Nakon dodavanja novog bloka jedan od lanaca postaje duži i proglašava se za zvanični lanac. Transakcije koje su bile u paralelnom lancu se vraćaju nazad u bazen neprihvaćenih transakcija i čekaju da budu uključene u neki od narednih blokova. Zbog pomenute karakteristike mreže savetuje se da korisnici sačekaju bar 10 minuta nakon prihvatanja njihove transakcije

u blok (važi za Bitkoin i većinu drugih PoW mreže). Na taj način se osigurava da su se svi problemi paralelnih lanaca rešili i da je transakcija trajno sačuvana u glavnom lancu blokova.

Prednost PoW algoritma je što je visoko decentralizovan i omogućava priključivanje velikog broja čvorova u mrežu bez velikog pada performansi. Algoritam je takođe izuzetno otporan na maliciozne čvorove koji su česti u javnim blokčejn mrežama bez prava pristupa. Najveća mana PoW algoritma je velika potrošnja energije. Takođe, protok transakcija u mrežama koje koriste PoW je ograničen zato što je za generisanje bloka potrebno vreme kako bi se izračunao heš koji zadovoljava karakteristike. Smanjenje vremena računanja heša smanjuje bezbednost algoritma, stoga je problem protoka transakcija teško rešiv uz upotrebu PoW algoritma.

PoS je osmišljen kao energetski efikasnija alternativa za PoW algoritam i nasleđuje mnogo njegovih karakteristika. Umesto da koristi računarske resurse (kroz računanje heš funkcija), PoS generiše finansijsku inicijativu za validatore (čvorove koji zamenjuju rudare) da poštuju pravila mreže. Svaki čvor mora založiti značajne količine kriptovalute da bi dobio pravo da bude validator. Iz skupa validatora se nasumično bira validator koji ima pravo da generiše sledeći blok, dok ostali učesnici prate njegove akcije. Ukoliko validator počne da se ponaša maliciozno, on gubi sva založena sredstva i gubi pravo da bude validator mreže u budućnosti.

Glavna prednost PoS algoritma je to što je energetski efikasan. On takođe omogućava veći protok transakcija u odnosu na PoW i smanjuje rizik da će čvorovi koji imaju veliku računarsku moć preuzeti kontrolu nad mrežom. Mana algoritma je to što korisnici koji već imaju značajne količine sredstava nastavljaju da gomilaju svoja sredstva tako što budu nagrađivani za svoje poslove validatora. Takođe, algoritam je otvoren za kompleksne napade poput NTS (engl. Nothing at Stake) [42].

Tebala 2.1 pruža sažeto poređenje opisanih algoritama.

2.3 Korda

Korda je DLT platforma razvijena od strane R3 kompanije i specifično je napravljena za upotrebu u bankarstvu, biznisu i širom finansijskom sektoru [43]. R3 predstavlja i predvodi konzorcijum od preko 200 članica, od kojih se izdvajaju velike banke poput Banke Amerike (engl. Bank of America), Goldman Saksa (engl.Goldman Sachs) i Kredit Suiza (engl. Credit Suisse). Za razliku od tradicionalnih blokčejn tehnologija poput Bitkoina i Itirijuma, Korda ne poseduje lanac blokova koji u sebi sadrži sve transakcije, tako da se tehnički nekategorizuje kao blokčejn. Ona je specijalizovana DLT tehnologija koja poseduje jedinstven model deljenja podataka koji još donosi većinu prednosti blokčejn tehnologija, ali i pruža veći stepen privatnosti. Arhitektura Korda sistema je osmišljena uz veći osvrt na privatnost i uklapanje u regulatorne okvire biznis okruženja, što odstupa od filozofije javnih blokčejn tehnologija. Međutim,

Tabela 2.1: Uporedni prikaz konsenzus algoritama PBFT, PoW, PoS i Raft

Osobina	**PBFT**	**PoW**	**PoS**	**Raft**
Tip tolerancije na greške	Maliciozne	Maliciozne	Maliciozne	Otkaz
Tip mreže	Privatne	Javne	Javne ili privatne	Privatne
Energetska efikasnost	Srednja	Niska	Visoka	Visoka
Skalabilnost	Niska (do ∼50 čvorova)	Niska (nizak protok, $<$ 20 TPS)	Visoka (stotine do hiljade TPS)	Srednja do visoka
Vreme do finalizacije	Trenutno (determinističko)	Verovatnosno (nije trenutno, potrebno vreme za sigurnost)	Polu-trenutno (brzo, nekoliko sekundi/minuta)	Trenutno (determinističko nakon potvrde većine)
Način obezbeđivanja sigurnosti	Velika redundansa komunikacije	Visoki trošak računarske snage	Ekonomska inicijativa (*zalog*)	Izbor lidera i replikacija podataka
Ranjivost / slabosti	Veliki troškovi komunikacije	Centralizacija rudarske moći	Centralizacija vlasništva, kompleksni napadi (NTS)	Ne toleriše maliciozne otkaze

ona pametno kombinuje P2P mehanizme komunikacije, konsenzus algoritme i ostale koncepte koji je čine jedinstvenom. Jedinstvenost se ogleda u mogućnosti upotrebe tehnologije u slučajevima gde su smanjena redundansa podataka i transparentnost prihvatljiva zamena za bolje performanse i privatnost.

Jedna od ključnih funkcionalnosti Korde koja je razlikuje od javnih blokčejnova i stavlja u kategoriju privatnih DLT mreža je poznavanje identiteta učesnika u mreži. Svi učesnici se moraju identifikovati i njihove informacije su poznate pre priključivanja mreži. Transakcije u Korda mreži se odvijaju direktno između učesnika i nisu deljene svim korisnicima kao što je to uglavnom praksa kod blokčejn tehnologija. Učesnici transakcije mogu izabrati da podele podatke i sa drugim učesnicima u mreži koji nisu direktni učesnici transakcije. Ova funkcionalnost pruža mogućnost za privatnošću u mreži. Neki korisnici mogu odlučiti da podele svoju transakciju sa svim članovima mreže, dok drugi mogu izabrati malu listu korisnika koji će biti svesni o postojanju transakcije i koji će videti podatke koji su u njoj podeljeni.

Korda transakcije se izvršavaju uz direktnu komunikaciju između njenih učesnika. Rezultat takve komunikacije je potpuna privatnost transakcija. Učesnici koji nisu deo privatne komunikacije nisu svesni o izvršavanju transakcije niti o njenom postojanju nakon finalizacije transakcije. Specijalni čvorovi, notari, (engl. notary) su zaduženi za verifikaciju jedinstvenosti transakcija i osiguravaju da ne dođe do duple potrošnje (engl. double spending problem) [44]. Notari obavljaju ovaj posao tako što obeležavaju svako stanje (engl. state) u mreži (tj. svaki sačuvani objekat u transakciji) kao potrošen

ili nepotrošen. Ukoliko se neko stanje u distribuiranoj bazi promeni, staro sačuvano stanje se označava kao potrošeno i novo stanje se upisuje u bazu kao poseban unos. Ovim se osigurava da se problem dvostruke potrošnje može rešiti od strane notara bez eksplicitnog otpakivanja transakcije. Kroz praćenje potrošnje stanja čak ni notari koji verifikuju transakcije ne vide podatke u transakcijama osim ako je to eksplicitno zatraženo.

Pametni ugovori u Kordi se implementiraju kroz dva koncepta. Jedan je koncept ugovora (engl. contract) dok je drugi koncept toka (engl. flow). Ugovori u Kordi nisu slični pametnim ugovorima u Itirijumu i drugim blokčejn platformama. Oni više liče na standardne pravne ugovore i definišu pravila koja transakcije i stanja koja su rezultat transakcija moraju da poštuju. Korda ugovori ne opisuju tok transakcije niti sadrže poslovnu logiku, to je zadatak Korda tokova. Tokovi u Kordi podsećaju na pametne ugovore u Itirijumu, štaviše oni poseduju širi skup mogućnosti od tradicionalnih blokčejn pametnih ugovora. Korda tokovi mogu određivati ko su učesnici u transakcijama i opisuju funkcionalnosti koje svako od članova transakcije mora da izvrši da bi transakcija bila validna. Od nekih učesnika se može očekivati da potpišu podatke u transakciji, dok se od drugih zahteva da izmene stanje transakcije i takođe potpišu transakciju. Šabloni koji se koriste u opisu Korda tokova se pišu u jezicima opšte namene poput Jave i Kotlina. Oni su značajno fleksibilniji od standardnih šablona (engl. framework) za pisanje pametnih ugovora u ostalim DLT i blokčejn tehnologijama.

Postoje dva tipa konsenzusa u Kordi: konsenzus validacije i konsenzus jedinstvenosti. Verifikacioni konsenzus se ogleda u proveri ispravnosti transakcije od strane svakog od učesnika transakcije. Verifikaciona pravila su definisana u Korda tokovima i transakcija će biti prekinuta u slučaju da neki od korisnika primeti nepravilnosti. Konsenzus jedinstvenosti se ogleda u proveri od strane notara da učesnik u transakciji nije iskoristio isto Korda stanje dva puta. Konsenzus jedinstvenosti osigurava da ne dolazi do duple potrošnje.

Kako su Korda ugovori pisani u jezicima opšte namene i dozvoljavaju izvršavanje proizvoljnog koda, njihova integracija sa eksternim sistemima je jednostavna. U Korda tokovima je moguće pozivati proizvoljni API, moguće je komunicirati sa: eksternim bazama podataka, sistemima za slanje poruka ili drugom proizvoljnom aplikacijom. Pomenute funkcionalnosti pružaju Korda developerima izuzetno veliku slobodu u poređenju sa drugim blokčejn tehnologijama poput Itirijuma. Radi smanjenja prostora za manipulacije i greške prilikom pisanja pametnih ugovora, za to se često koriste jezici specifični za domen (engl. domain specific languages) poput Soliditija (engl. Solidity) [45] koga koristi Itirijum. Sa druge strane, Hajperledžer Febrik i Korda koriste jezike opšte namene za pisanje svojih pametnih ugovora. Stoga su Korda tokovi izuzetno fleksibilan način za pisanje poslovne i konsenzus logike u DLT sistemima.

Transakcije u Kordi su podeljene samo između njenih učesnika i samo podskup svih čvorova u mreži učestvuje u obrani, verifikaciji i čuvanju transakcija. Ovo u velikoj meri smanjuje probleme prekomerne komunikacije između čvorova u mreži. Takođe, kako samo podskup čvorova koji je učestvovao u transakciji čuva njene podatke, veličina baza podataka Korda čvorova je značajno manja u poređenju sa bazama drugih konkurentnih tehnologija. Pomenute karakteristike Korde pozitivno utiču na njene performanse i smanjuju potrošnju računarskih resursa. Jedan od ključnih razloga za izbor Korde kao tehnologije za implementaciju predložene distribuirane arhitekture za trgovanje energijom predstavljene u ovoj disertaciji je baš to što tehnologija u specifičnim slučajevima upotrebe (kao što je ovaj) pruža dobre performanse.

Sumirano, ono što Kordu čini specifičnom u odnosu na ostale DLT i blokčejn tehnologije je:

- Nema globalne distribuirane glavne knjige - samo učesnici u transakcijama čuvaju transakcije i postoji mnogo kriptografski povezanih lanaca Korda stanja koji nisu sumirani u globalnu distribuiranu knjigu.
- Korda ugovori liče na pravne ugovore - mogu se lakše uklopiti u pravne okvire.
- Poznavanje identiteta učesnika - svaki učesnik mreže zna identitet drugih učesnika s kojima komunicira. Ovo čini Kordu dodatno privlačnom u slučajevima gde je pravno neophodno garantovati da su određeni učesnici izvršili neke akcije pre prihvatanja transakcija.
- Fleksibilan konsenzus - Korda podržava više različitih konsenzus mehanizama uključujući Raft i konsenznus algoritme vizantiskog tipa.
- Privatnost - nedostatak globalne glavne knjige pruža nivo privatnosti koji je pogodan za poslovne interakcije i očuvanje privatnosti učesnika

U Tabeli 2.2 je prikazana razlika između Korde i drugih DLT tehnologija kao što su Itirijum, Bitkoin i Hajperledžer Febric.

2.4 Struktura elektroenergetskih mreža

Primarna tema disertacije i njeni doprinosi su u sferi softverskog rešenja koja potpomaže trgovanju energijom. Međutim, kako je predložena softverska arhitektura primenjena u domenu elektroenergetike, poželjno je ukratko objasniti osnovne koncepte rada elektroenergetskih mreža i zakonitosti kojima se softverski sistemi napravljeni za podršku trgovanju električnom energijom moraju povinovati.

Većina problema u distribuciji električne energije nastaje zbog činjenice da se proizvedena električna energija mora odmah i potrošiti. Mehanizmi za čuvanje električne energije su i dalje skupi da bi bili isplativi na komercijalnom nivou, tako da operatori mrežnih sistema moraju konstantno da vode računa da prilagode proizvodnju potrošnji energije. Ukoliko u optimizaciji proizvodnje dodamo da proizvedena struja takođe mora da bude određenog kvaliteta, posao održavanja mreže postaje dodatno

Tabela 2.2: Razlike između Korde i tradicionalnih blokčejnova (Itirijuma, Bitkoina i Hajperledžer Febrika).

Osobina	**Corda**	**Itirijum/Bitkoin**	**Febrik**
Deljenje podataka	Direktno P2P	Globalno emitovanje	Privatne grupe
Identiteti	Eksplicitni	Anonimni	Eksplicitni
Konzensus mehanizam	Validacijoni + Jedinstvenost	PoW i PoS	PBFT/Raft/Kafka
Jezik za pametne ugovore	Java/Kotlin	Solidity/Vyper	Go/JavaScript/Java
Privatnost i poverljivost	Samo uključene strane vide podatke	Javna vidljivost	Privatnost kroz grupe
Integracija sa pravom	Eksplicitna veza sa pravnim dokumentima	Nema direktne pravne povezanosti	Opcionalna, nije podrazumevana
Performanse	Visoke	Niske	Visoke
Skalabilnost	Visoka	Ograničena	Visoka

komplikovaniji. Pri kvalitetu struje pretežno se misli na održavanje konstantnog napona i frekvencije naizmenične struje. Olakšavajuća činjenica pri optimizaciji elektroenergetskih mreža je velika inertnost sistema. Naglo povećanje potrošnje neće odmah značajno narušiti frekvenciju struje zato što se većina energije proizvodi uz pomoć termalnih ili hidroelektrana čiji generatori imaju jaku inerciju pri generisanju energije, tako da amortizuju nagle i kratke promene u potražnji. Međutim, u slučajevima produžene povećane potražnje (često u večernjim satima) potrebno je povećati proizvodni kapacitet. Kako su generatori u nuklearnim, termalnim i hidroelektranama spori u dostizanju radnog kapaciteta i sinhronizaciji sa ostatkom mreže, često se u tim uslovima koriste mali generatori koji postaju brzo operativni. Alternativa je i održavanje malog broja operativnih generatora koji nisu povezani na mrežu već se koriste samo u slučajevima visoke potražnje. Mana ovog pristupa je smanjena efikasnost elektrane, pogotovo u slučajevima termoelektrana.

Dakle, elektroenergetske mreže su izuzetno komplikovani sistemi koji se sastoje od velikog broja proizvođača i potrošača koji imaju za cilj neometanu i stabilnu distribuciju električne energije. Održavanje stabilnosti sistema nije trivijalan posao i zahteva koordinaciju između različitih proizvođača uz konstantno predviđanje potrošnje radi pripreme sistema na povećanje potražnje. U slučajevima kada potrošnja prevazilazi proizvodnju, dolazi do pada frekvencije sistema. Mali pad frekvencije (manji od jednog Hz) može biti veoma štetan za veliki broj uređaja, stoga je mreža najčešće

projektovana tako da nakon ozbiljnijeg pada napona dolazi do parcijalnih ili totalnih restrikcija. Uprkos svim pomenutim poteškoćama, ovakvi sistemi već decenijama neometano distribuiraju električnu energiju i tehnike za njihovu stabilizaciju su dovoljno napredne i ustaljene da krajnji korisnici često nemaju osećaj o tome koliko napora je neophodno za stabilizaciju ovakvih sistema.

Tradicionalno se elektroenergetski sistemi sastoje od malog broja velikih proizvođača energije koji su često izmešteni van centara populacije gde se najveća količina energije konzumira. Kako je transfer proizvedene električne energije kroz velike razdaljine koje mogu dostići i stotine kilometara veoma neefikasan ukoliko se energija prenosi u proizvedenom obliku, potrebno je transformisati energiju značajnim povećanjem voltaže i u tom obliku je slati potrošačima.

Slika 2.3 prikazuje tradicionalne elektroenergetske sisteme. Energija se prvo proizvodi u velikim elektranama, njena voltaža se zatim podiže (red veličine hiljade volti) kako bi se uz minimalne gubitke prenela do krajnjih potrošača gde se voltaža opet spušta (red veličine stotina volti) kako bi se energija koristila od strane krajnjih korisnika. Električna snaga (P) se iskazuje u vatima i predstavlja merilo količine energije koja se prenosi. Električna snaga se računa kao proizvod napona (U) iskazanog u voltima i struje (I) iskazane u amperima (Jednačina 2.1).

$$P = U * I \tag{2.1}$$

Gubitak energije prilikom prenosa koji se manifestuje kao zagrevanje provodnika se računa po istoj formuli. Pad napona između dva kraja provodnika se predstaviti po Omovom zakonu kao proizvod struje merene u amperima (A) i otpornosti provodnika merene u omima (Ω) (Jednačina 2.2).

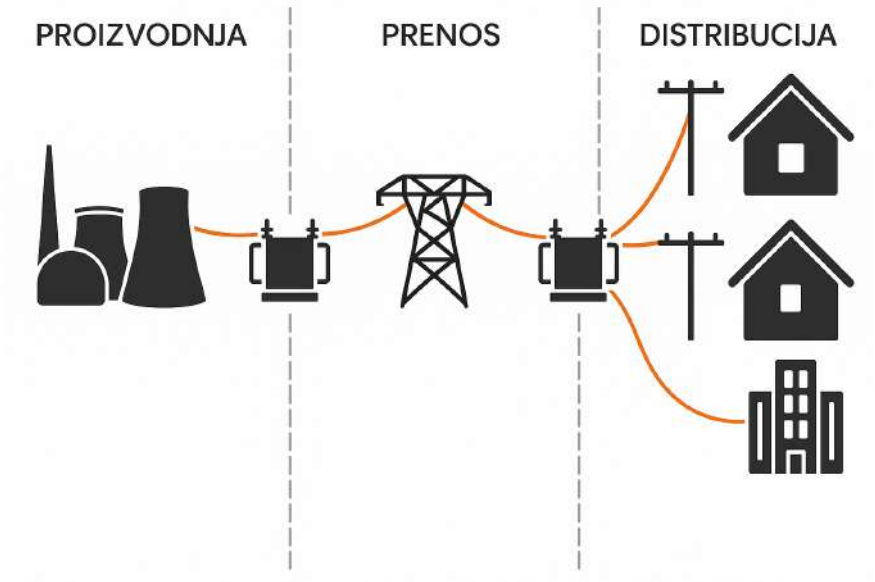
$$U = I * R \tag{2.2}$$

Kombinovanjem ove dve formule dobija se nova Jednačina 2.3 za merenje gubitka u provodnicima.

$$P = I^2 * R \tag{2.3}$$

Kako bi se smanjili gubitci pri prenosu, moguće je fokusirati se na otpor R kroz upotrebu materijala koji imaju manju otpornost ili povećanjem prečnika provodnika. Međutim, kako struja kvadratno utiče na povećanje gubitaka, optimalni put za smanjenje gubitaka je smanjenje struje povećanjem električnog napona. Dakle, gubici u prenosu su glavni razlog zašto se vrši podizanje napona prilikom prenosa električne energije.

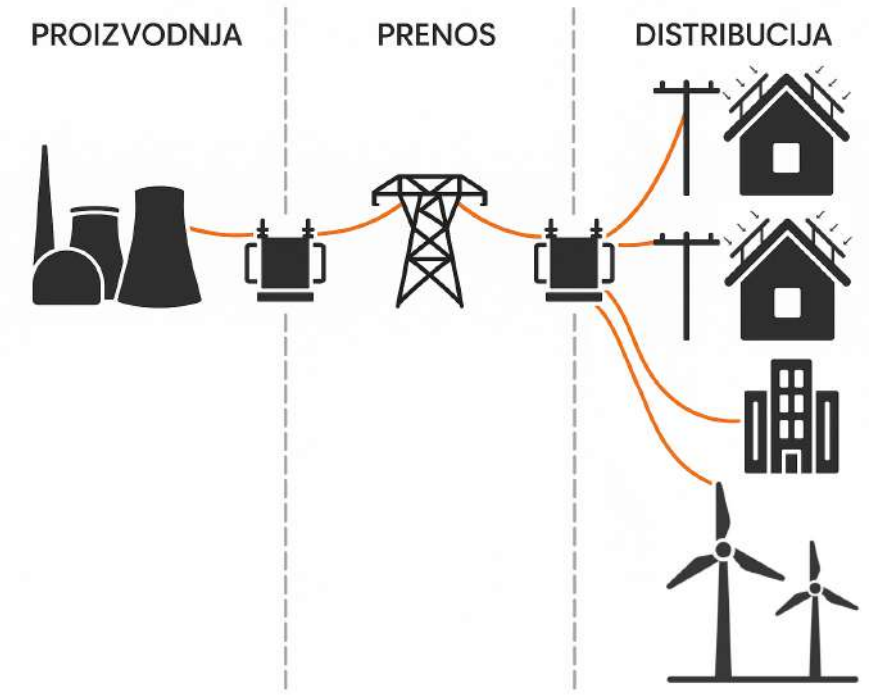
Gubitak pri prenosu energije i primarno prljave tehnologije za proizvodnju energije



Slika 2.3: Tradicionalna struktura elektroenergetskih mreža

nameću da Slika 2.3 predstavlja primarni dizajn elektroenergetskih mreža. Većina energije proizvodi se na jednom mestu, zatim dalekovodima prenosi do krajnjih potrošača koji je koriste. Uvođenje obnovljivih izvora energije poput solarnih panela i vetrogeneratora uvodi dve novine u odnosu na tradicionalni dizajn sistema:

- Izbori električne energije nisu konstantni - često se u praksi prave solarne ili vetro fabrike koje kombinuju velike količine solarnih panela ili vetro generatora i tako u velikoj meri liče na tradicionalne elektrane. Ovakve farme su često udaljene od centara populacije i proizvedena energija takođe mora da se prenosi kroz povećanje napona. Glavna razlika u odnosu na tradicionalne elektrane je u tome što je proizvodnja energije koju grupe obnovljivih proizvođača nude i dalje vrlo uslovljena spoljašnjim uslovima. Ovo otežava proces stabilizacije mreže i zahteva naprednije algoritme za predviđanje proizvodnje električne energije.
- Prozjumeri su mali i distribuirani proizvođači energije - tradicionalni dizajn sistema (videti Sliku 2.3) se menja kroz postojanje malih potrošača koji proizvode energiju u krajnjem distributivnom sektoru elektroenergetskih mreža (videti Sliku 2.4). Ovakav tip proizvodnje energije na malom nivou nije problematičan pošto su elektroenergetske mreže veliki sistemi i mogu da amortizuju male promene u proizvodnji i potrošnji. Međutim, u slučajevima gde mali proizvođači energije iz obnovljivih izvora predstavljaju značajan procenat ukupno proizve-



Slika 2.4: Moderna struktura elektroenergetskih mreža

dene energije, stabilizacija sistema postaje problematična. Operateri koji se tradicionalno bave stabilizacijom nemaju kontrolu niti pristup informacijama o proizvodnji prozjumera, što može dovesti do problema pri stabilizaciji mreže.

Poglavlje 3

Pregled literature

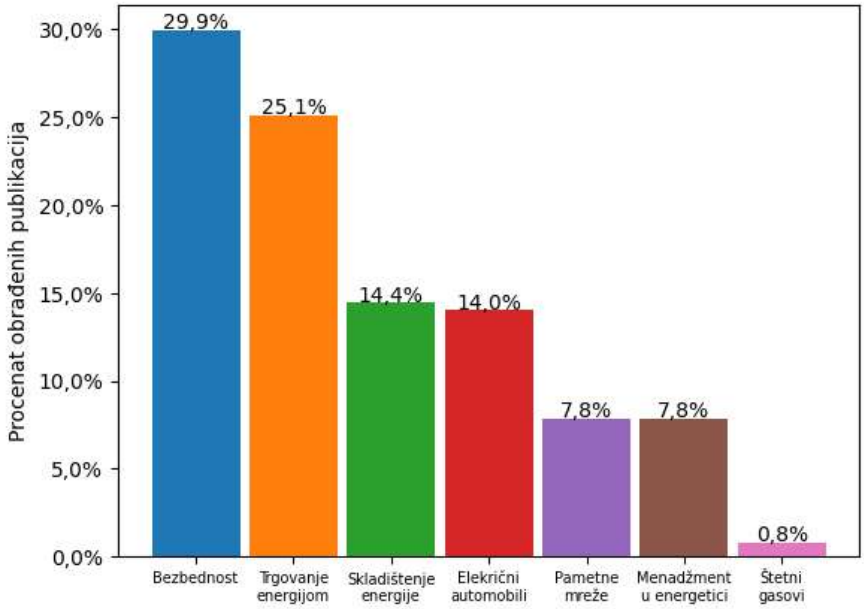
Primarna tema ove doktorske disertacije je DLT bazirana softverska arhitektura za podršku trgovanju električnom energijom. Stoga se prvi deo pregleda literature fokusira na analizu postojećih DLT sistema koji su primenjeni u oblasti energetike. Disertacija se takođe bavi testiranjem performansi predložene arhitekture softverskog sistema, te se druga i treća sekcija bave pregledom literature koji se fokusira na merenje performansi DLT sistema i analizu potrošnje električne energije od strane DLT sistema.

3.1 Upotreba DLT u energetici

Upotreba DLT i blokčejn tehnologije raste u mnogim različitim oblastima, uključujući i domen energetike [46–48]. Nekoliko radova već pruža široke studije o primeni blokčejna u elektroenergetskim mrežama i u energetskom sektoru u celini. Studija koju je uradio Andoni i dr. [46] jedna je od prvih sistematskih pregleda blokčejn aplikacija u energetskom sektoru. Studija od strane Andonija i dr. je sveobuhvatna i objavljena je 2019. godine. Ona je upoređena sa dve novije široke studije [47, 48] iz 2022. godine kako bi se uvideli trendovi upotrebe blokčejn tehnologije u oblasti energetike.

Procenat publikacija o primeni blokčejn tehnologije u energetskom sektoru prikazan je na Slici 3.1. Od 769 članaka, 25,1% fokusira se na upotrebu blokčejna u trgovini energijom, 14,44% na skladištenje energije i 7,8% na pametne elektroenergetske mreže [48]. Gotovo 50% članaka bavi se problemima koji su takođe predmet ove disertacije. To ukazuje na popularnost teme i postojanje velikog broja problema u oblasti za čijim optimalnim rešenjima se i dalje traga.

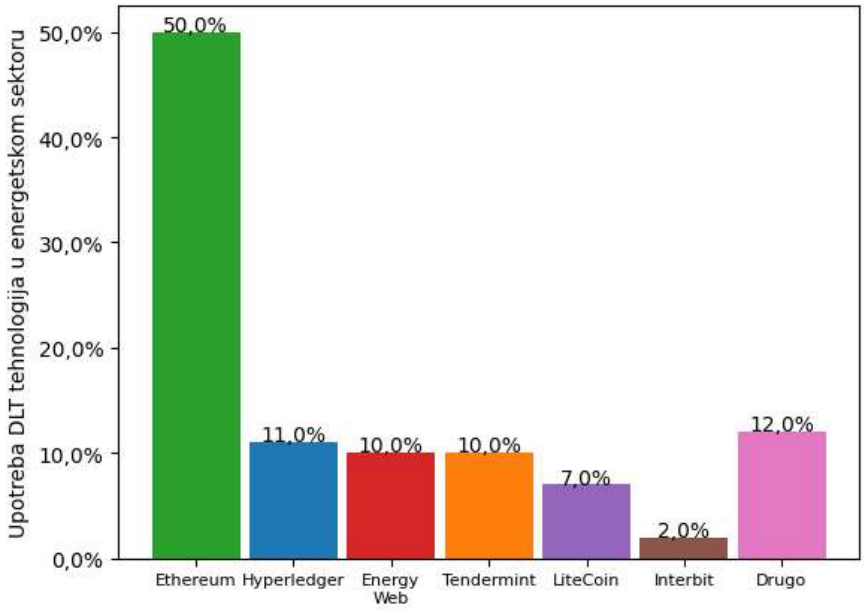
Rezultati opisani u radovima [46] i [47] uključuju i klasifikaciju DLT tehnologija koje se koriste u energetskom sektoru. Oba članka obuhvataju širok spektar radova i objavljena su sa razmakom od tri godine, što pomaže u praćenju tehnoloških trendova. Na Slici 3.2 vidimo da 50% od 140 ispitanih studija koristi Itirijum kao osnovnu tehnologiju, zatim slede Hajperledžer Febrik i Enerdži Veb (engl. Energy Web). Slika 3.3 zasniva se na novijoj studiji i pokazuje da 90% od 769 radova koristi Itirijum mreže za izradu blokčejn rešenja u energetici, dok samo 2,8% koristi Hajperledžer



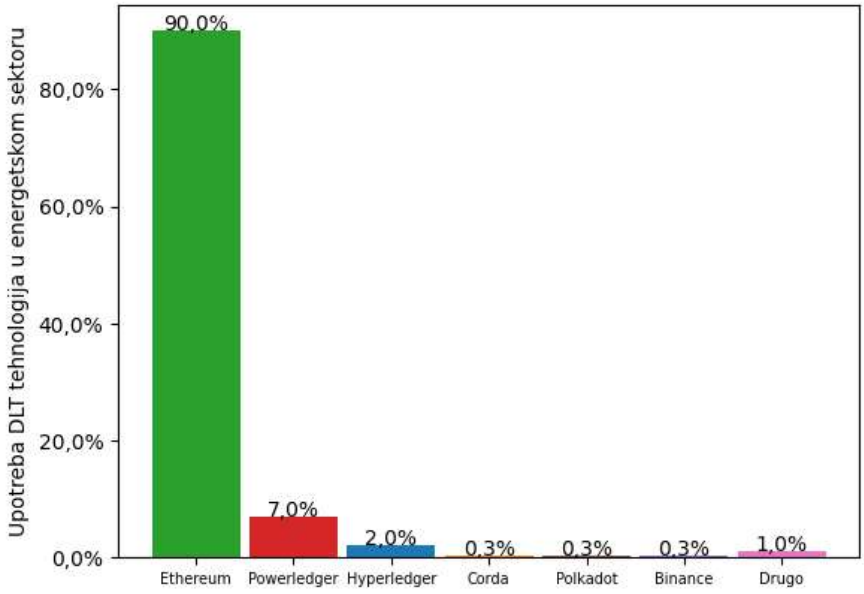
Slika 3.1: Raspodela publikacija baziranih na DLT tehnologiji prema njihovoj upotrebi u energetici [49]

Fabrik. Predstavljeni podaci ukazuju na trend sve češće upotrebe dobro uspostavljenih i pouzdanih blokčejn tehnologija, kao što je Itirijum.

Prednosti korišćenja već dobro poznatih i pouzdanih tehnologija kao osnove za razvoj distribuiranih sistema su mnogobrojne. Međutim, to znači i prihvatanje svih nedostataka koji dolaze sa upotrebom takvih tehnologija. Javne Itirijum mreže dele resurse među svim učesnicima i mogu postati zagušene u periodima velike potražnje. Privatne Itirijum mreže rešavaju ovaj problem i koriste se samo od ograničene grupe učesnika, ali i dalje ne pružaju dovoljno visok protok transakcija (engl. throughput) neophodan za upravljanje velikim energetskim sistemima. Skaliranje Itirijuma moguće je samo do određenog nivoa zbog njegove arhitekture [50]. Itirijum se razvija i nedavno je unapređen prelaskom sa algoritma dokaza o radu (POW) na algoritam dokaza o uloženom resursu (POS). Ova promena ga je učinila poželjnijim jer više nije potrebna prekomerna potrošnja energije za održavanje mreže [51], ali nije značajno promenila druga ograničenja koja su pretežno vezana za performanse. Stoga, Itirijum i dalje nije idealan izbor tehnologije za razvoj DLT sistema za podršku trgovanju ukoliko je neophodan visok protok transakcija i niska potrošnja energije.



Slika 3.2: Raspodela upotrebe DLT tehnologije u energetici 2019. godine [49]



Slika 3.3: Raspodela upotrebe DLT tehnologije u energetici 2022. godine [49]

3.1.1 Postojeća rešenja za podršku trgovanja električnom energijom bazirana na DLT tehnologiji

Jedan od pionirskih pokušaja korišćenja DLT tehnologija za podršku trgovanju električnom energijom jeste projekat Bruklin Mikrogrid (engl. Brooklyn Microgrid) [52]. Projektom je u Bruklinu, predgrađu Njujorka, implementiran P2P sistem za trgovinu energijom među korisnicima u maloj mikromreži. Projekat je bio uspešan i njegovo testiranje je trajalo tri meseca. Tehnologija koja je omogućila prozjumerima da direktno prodaju energiju drugim učesnicima mreže bazira se na javnoj Itirijum mreži u kombinaciji sa konsenzus algoritmom PBFT [53], implementiranim pomoću Tendermint-a.

Postoji značajan broj naučnih radova i industrijskih rešenja koja primenjuju DLT za trgovinu energijom [54–59]. Neka rešenja poput [56] i dalje koriste PoW algoritam, koji zahteva puno energije i duže vreme obrade transakcija. Rešenje koristi šeme plaćanja zasnovane na kreditima, pri čemu čvorovi imaju strategiju kreditiranja i shodno tome traže pozajmice. U radu [**?**] prikazano je korišćenje Itirijum pametnih ugovora za implementaciju mehanizma za trgovanje energijom u okviru virtuelnih elektrana (engl. Virtual Power Plants - VPP). Prelazak Itirijuma sa PoW na PoS algoritam čini ovo rešenje nešto privlačnijim, ali upotreba javne blokčejn mreže i dalje može prouzrokovati izuzetno visoke troškove transakcija. Druga rešenja, kao što su [54] i [55], koriste privatne blokčejn mreže sa kontrolom pristupa poput Hajperledžer Febrika za P2P trgovanje energijom. Autori u [55] primenjuju dvofazni algoritam za podršku trgovanju energijom: u prvoj fazi zakazuju potrošnju energije nekoliko dana unapred, dok se u drugoj fazi potrošnja planira nekoliko sati unapred i fokusira se na upravljanje mrežom u realnom vremenu. Dalje, u [54] se prepoznaju entiteti kao što su energetski čvor, agregator energije i pametna brojila. Energetski čvorovi kupuju ili prodaju energiju u skladu sa potrebama i stanjem energije, dok agregatori energije služe kao posrednici u trgovanju. Kompanija General Electric istražuje upotrebu Digitalnih elektrana (engl. Digital Power Plants) [60], koje će takođe koristiti Hajperledžer Febrik za implementaciju sistema koji rukuje elektranama sa malim i srednjim veličinama generatora. Rešenje je fokusirano na zadovoljavanje različitih potreba elektroenergetskih postrojenja sa brzom i inteligentnom infrastrukturom.

Dalji primeri rešenja za trgovinu energijom zasnovanih na DLT tehnologiji mogu se pronaći u naučnim radovima [61–65]. Hamouda i dr. [61] koriste pametna brojila za formiranje okvirnog tržišta energije. Implementiraju model tržišta koji kreira očekivane transakcije energijom, ali i prati stvarne podatke o transakcijama iz pametnih brojila u realnom vremenu. Svi ovi podaci se grupišu u blokove koji su deo prilagođenog blokčejn rešenja, napisanog u Pajtonu. Autori u [62] predstavljaju rešenje koje omogućava prozjumerima i drugim manjim proizvođačima da višak energije ponude putem inteligentnog posredovanja zasnovanog na Itirijum blokčejn tehnologiji. U

radu [63] predstavljen je privatni blokčejn sistem koji služi kao bezbedan posrednik između kontrolora lokalnih mikromreža i operatora mreže. Cilj mu je da reši problem protoka energije u distribuiranoj mreži i implementiran je upotrebom privatne Itirijum tehnologije. Autori u [65] koriste simulirani Itirijum blokčejn i izvršavaju njegove pametne ugovore kako bi koordinisali decentralizovani pristup problemu ekonomskog raspoređivanja (engl. economic dispatch) jedinica distribuirane proizvodnje.

Rad [66] predstavlja sistem zasnovan na blokčejnu dizajniran za olakšavanje formiranja transakcija za trgovinu energijom među prozjumerima, električnim vozilima, elektroprivredama i pružaocima skladišta energije. Autori su implementirali dve verzije ovog sistema upotrebom Hajperledžer Febrik platforme. Jedna koristi zamenjive tokene (engl. fungible tokens) za predstavljanje sredstava, dok druga koristi nezamenjive tokene (engl. non-fungible tokens) za predstavljanje nedeljivih sredstava. Autori su osmislili algoritme za upravljanje životnim ciklusom tokena, analizirali njihove složenosti i razvili ih kao pametne ugovore u cilju testiranja performansi. Rezultati pokazuju da obe implementacije imaju slične performanse pri izvršavanju najbitnijih operacija, postižući protok od 448,3 transakcije po sekundi za najsporiju operaciju uz razumno niske infrastrukturne zahteve.

Lukas i dr. [67] istražuje primenu blokčejn tehnologije radi unapređenja praćenja i validacije upravljanja potrošnjom u energetskim sistemima. Autori su razvili platformu koristeći Hajperledžer Fabrik za sigurno beleženje i deljenje događaja među zainteresovanim stranama kao što su operatori prenosnog sistema, agregatori, operatori distributivnog sistema, odgovorne strane za balansiranje mreže i prozjumeri. Laboratorijsko okruženje sa sistemom za skladištenje energije od 450 kW korišćeno je za simulaciju usluga, pri čemu je sistem odgovarao na zahteve operatora, a događaji su beleženi na blokčejnu. Evaluacije performansi su pokazale da je ukupno vreme izvršenja bilo ispod jedne sekunde za do 32 zahteva poslata po sekundi, sa iskorišćenošću CPU ispod 5% za različite veličine mreže (3, 10 i 28 čvorova).

Rad [68] predlaže platformu koja omogućava prozjumerima da direktno prodaju višak energije lokalnim potrošačima putem pametnih ugovora. Ovaj sistem povećava profit prozjumerima i smanjuje troškove potrošačima izbegavanjem tradicionalnih energetskih provajdera. Studija razmatra četiri scenarija trgovine: (1) transakcije na osnovu blizine, (2) povezivanje s potrošačima sa visokom trenutnom potražnjom, (3) trgovinu prema dnevnoj potrošnji energije i (4) transparentan blokčejn sistem po principu "ko prvi dođe, prvi bude poslužen". Testiranje na mikromreži pokazalo je efikasnost platforme u poboljšanju distribucije energije i finansijskih koristi. Korišćenjem blokčejna i pametnih ugovora, ovaj sistem podstiče lokalnu trgovinu energijom i podržava održive i decentralizovane energetske mreže.

Istraživači u [69] uvode decentralizovani pristup upravljanja potrošnjom (engl. Demand Response - DR) korišćenjem blokčejn tehnologije, kroz implementaciju pametnih

ugovora na Itirijum platformi. U ovom sistemu, distribuirana glavna knjiga zasnovana na blokčejnu sigurno čuva podatke o potrošnji i proizvodnji energije prikupljene sa IoT pametnih brojila, obezbeđujući integritet i transparentnost podataka. Samoizvršavajući pametni ugovori se koriste za: programsko definisanje energetske fleksibilnosti za svakog prozjumera, utvrđivanje nagrada ili kazni i uspostavljanje pravila za balansiranje energetske potrošnje sa proizvodnjom. Mehanizmi validacije zasnovani na konsenzusu koriste se za autentifikaciju DR događaja i pokretanje odgovarajućih finansijskih poravnanja za pružaoce usluga. Pristup je validiran korišćenjem prototipa implementiranog na Itirijum platformi i koristi podatke o potrošnji i proizvodnji energije iz različitih zgrada. Rezultati pokazuju da ovaj sistem distribuiranog upravljanja potražnjom zasnovan na blokčejnu efikasno usklađuje energetsku potrošnju i proizvodnju na nivou pametne mreže. Sistem pruža visok stepen tačnosti u praćenju DR signala i smanjuje potrebu za stabilizacijom sistema.

Rad [70] uvodi inovativan pristup upravljanju distribuiranim energetskim resursima korišćenjem blokčejn tehnologije unutar okvira virtuelne elektrane. Ova platforma omogućava korisnicima opremljenim obnovljivim izvorima energije, sistemima za skladištenje energije i fleksibilnim opterećenjima da učestvuju u energetskim transakcijama. Korisnici mogu da se uključe u P2P trgovinu energijom i učestvuju u mrežnim uslugama. Mrežne usluge mogu biti: isporuka energije, obezbeđivanje rezerve i kupovina energije. Korišćenjem decentralizovane prirode blokčejna, platforma obezbeđuje transparentnost i sigurnost u energetskim transakcijama. Decentralizovani optimizacioni algoritam za trgovanje poštuje autonomiju i privatnost korisnika. Eksperimentalne evaluacije korišćenjem stvarnih podataka ukazuju da ova platforma zasnovana na blokčejnu može smanjiti troškove pojedinačnih korisnika do 38,6% i ukupne sistemske troškove za 11,2%.

Arhitektura za trgovinu distribuiranom energijom zasnovana na Vizantijskom konsenzusu predstavljena je u radu [71]. Ovaj sistem za trgovinu različitim tipovima energije zasnovan je na blokčejnu B-MET koji pruža sigurne i efikasne energetske transakcije u pametnim gradovima. Istraživanje se bavi ključnim izazovima u trgovini distribuiranom energijom, posebno rizicima u vezi sa bezbednošću i privatnošću tradicionalnih centralizovanih platformi. Integracijom Vizantijskog konsenzus mehanizma sa konzorcijumskim blokčejnom, predloženi sistem povećava pouzdanost transakcija, smanjuje latenciju i povećava skalabilnost. Za razliku od konvencionalnih sistema trgovine energijom putem blokčejna koji se uglavnom fokusiraju samo na električnu energiju, ovaj sistem razmatra trgovanje električnom i toplotnom energijom. Time postaje pogodniji za upotrebu u realnim distribuiranim energetskim stanicama. Jedna od glavnih tehničkih inovacija u radu je dizajn Vizantijskog konsenzus mehanizma zasnovanog na kreditiranju. Mehanizam dodeljuje ocene poverenja čvorovima na osnovu njihovih prethodnih glasanja i koristi ga kao faktor u trgovanju. Ovaj sistem

podstiče poštovanje pravila mreže i poboljšava efikasnost validacije transakcija. Pored toga, rad primenjuje Stackelbergovu igru sa više lidera i više sledbenika kako bi modelovao trgovinske interakcije između agregatora distribuirane energije i distribuiranih energetskih stanica. Matematičko modeliranje osigurava optimalne strategije određivanja cena za agregatore energije, dok istovremeno održava fer tržišnu konkurenciju. Upotrebljivost ovog pristupa potvrđena je kroz numeričke simulacije koje pokazuju da predloženi sistem povećava efikasnost trgovine energijom i smanjuje troškove.

Rad [72] istražuje kako pametni ugovori zasnovani na blokčejnu mogu omogućiti distribuiranu trgovinu energijom unutar virtuelnih elektrana (VE). Studija predstavlja transakcioni model zasnovan na blokčejnu koji prati cenu električne energije u realnom vremenu, omogućavajući decentralizovano i transparentno formiranje cene. Korišćenjem pametnih ugovora, proizvođači i potrošači energije mogu automatizovati trgovinu, postavljati dinamične cene struje i osigurati sigurne i efikasne tržišne transakcije. Predloženi okvir omogućava distributerima energije da aktivno učestvuju u VE sistemima, poboljšavajući koordinaciju i raspodelu energetskih resursa. Sa tehničkog aspekta, istraživanje analizira ključne izazove u transakcijama zasnovanim na blokčejnu i nudi rešenja kao što su integracija distribuirane glavne knjige, automatizacija pametnih ugovora i konsenzus mehanizama. Predlaže se hibridni PoW i PoS konsenzus model kako bi se poboljšala brzina validacije transakcija i sigurnost. Takođe, rad naglašava korišćenje Itirijum pametnih ugovora za autonomno izvršavanje energetskih transakcija uz očuvanje integriteta podataka, zaštitu od falsifikovanja i privatnost učesnika. Eksperimentalni rezultati pokazuju da blokčejn VE sistem poboljšava efikasnost trgovine energijom, smanjuje troškove transakcija i podstiče otporno i decentralizovano energetsko tržište.

Decentralizovani P2P mehanizam trgovine koji koristi blokčejn tehnologiju za unapređenje maloprodajnog tržišta električne energije je opisan u radu [73]. Predložena blokčejn mreža omogućava brzu i sigurnu maloprodajnu trgovinu električnom energijom, uspostavljajući održivu lokalnu P2P platformu za trgovinu. Autori koriste Hajperledžer Febrik za modelovanje P2P mreže. Njegova sposobnost da obradi između 3.000 i 20.000 transakcija po sekundi omogućava formiranje tržišta električne energije u kom se trgovina dešava u realnom vremenu. Studija takođe pokazuje kako ovaj P2P mehanizam trgovine zasnovan na blokčejnu smanjuje ukupnu potrošnju energije. Rezultati simulacije, sprovedeni korišćenjem open-source blockchain simulatora i MATLAB-a, potvrđuju efikasnost predloženog dizajna.

Komercijalna rešenja

Power Ledger [74] predstavlja dobro testirano i zrelo rešenje za trgovinu energijom. Ono pruža širok spektar usluga, od upravljanja stabilnošću i fleksibilnošću mreže do P2P trgovine energijom. Trenutno ga koristi više od 30 klijenata u 10 zemalja. Kako

bi izbegli isključivu upotrebu javnih blokčejn mreža i smanjili potrošnju energije, Power Ledger koristi kombinaciju javnih i privatnih blokčejn tehnologija, opisanu u [74]. Pored toga, nude tokene poput POWR i Sparkz, kojima se može javno trgovati i preko kojih korisnici mogu ostvariti profit.

Vipavr (engl. WePower) [75] je platforma za trgovinu zelenom energijom koja omogućava finansiranje zelenih energetskih projekata, ulaganje u zelenu energiju i trgovinu njome. Platforma direktno povezuje poslovne kupce energije sa proizvođačima, omogućavajući im da unapred kupuju energiju po cenama nižim od tržišnih. Na taj način se uklanja složenost sklapanja ugovora o kupovini električne energije, korisnicima se pruža pravo da izaberu željeni obim obnovljive energije za kupovinu, povećava se vidljivost projekata koji proizvode obnovljivu energiju i povećava likvidnost tržišta obnovljive energije. Vipavr pomaže proizvođačima obnovljive energije da prikupe kapital izdavanjem sopstvenih energetskih tokena. Kompanija je razvila Itirijum tokene kako bi standardizovala, pojednostavila i globalno otvorila postojeći ekosistem za investiranje u energiju. Korišćenjem pametnih ugovora omogućava učesnicima da investiraju i finansiraju projekte zelene energije, kao i da pribave zelenu energiju na efikasan, siguran i transparentan način. Vipavr je osnovan 2016. godine i ima sedište u Vilnjusu, u Litvaniji.

San Kontrakt (engl. SunContract) [76] je platforma za trgovinu zelenom energijom koja povezuje potrošače energije direktno sa proizvođačima, sa ciljem da podstakne transparentno i isplativo tržište obnovljive energije. Korišćenjem blokčejn tehnologije, San Kontrakt pojednostavljuje transakcije u P2P sistemu, uklanjajući mnoge složenosti i posrednike karakteristične za tradicionalne ugovore o kupovini električne energije. Platforma korisnicima pruža fleksibilnost da izaberu tačan obim obnovljive energije koji žele da kupe. Platforma istovremeno pomaže proizvođačima zelene energije da osiguraju kapital kroz direktno angažovanje zajednice. Osnovan 2017. godine sa sedištem u Sloveniji, San Kontrakt koristi pametne ugovore kako bi osigurao efikasne, bezbedne i transparentne transakcije zelene energije za svoje učesnike.

Elektron (engl. Electron) [77] je tržište za trgovinu energijom zasnovano na blokčejnu, fokusirano na integraciju i trgovinu distribuiranim energetskim resursima radi stvaranja fleksibilnije i efikasnije elektroenergetske mreže. Kroz svoju platformu, Elektron povezuje različite zainteresovane strane poput: operatera mreža, dobavljača i krajnjih korisnika. Platforma pojednostavljuje registraciju korisnika, upravljanje podacima i distribuiranu trgovinu. Ovakav pristup ne samo da smanjuje administrativne barijere, već i poboljšava transparentnost tržišta, omogućavajući učesnicima da izaberu i trguju konkretnim količinama obnovljive energije. Sa sedištem u Ujedinjenom Kraljevstvu, Elektron blisko sarađuje sa regulatorima i industrijskim partnerima kako bi standardizovao procese, podstakao inovacije i na kraju ubrzao globalni prelazak na decentralizovani i zeleni energetski sistem.

3.1.2 Arhitekture postojećih rešenja za podršku trgovanja električnom energijom bazirana na DLT tehnologiji

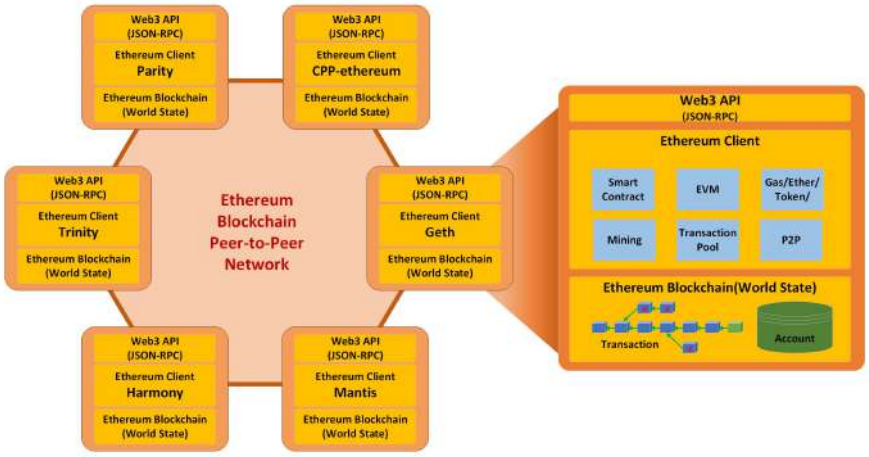
Kako je već prethodno navedeno u tekstu, DLT tehnologija koja se dominantno koristi u energetici je Itirijum. Čak 90% publikacija je odabralo Itirijum kao tehnologiju za razvoj decentralizovanih aplikacija u oblasti energetike [47]. Kako je ova brojka izuzetno visoka, bitno je objasniti arhitekturu Itirijum mreže i sagledati njene prednosti i mane.

Itirijum je jedna od najpopularnijih i, generalno gledano, najčešće korišćenih blokčejn tehnologija [78]. Itirijum se često naziva i svetskim računarom. Ovaj naziv je dobio zato što se sastoji od mnogo identičnih čvorova koji su geografski rasuti i održavani od strane različitih fizičkih i pravnih entiteta. Svi čvorovi na Itirijum mreži su identični i ravnopravni, a pravila ponašanja u mreži su definisana konsenzus algoritmom koji odlučuje o novom stanju u kojem će se sistem nalaziti nakon svake transakcije. U trenutku pisanja disertacije, globalan broj Ethereum čvorova koji funkcionišu po apsolutno istim pravilima kreće se između 10 i 15 hiljada [79].

Veliki broj čvorova Itirijum mreži daje izuzetnu robustnost, i ona se koristi u širokom spektru oblasti van energetike. Dominantna oblast u kojoj se Itirijum danas koristi su finansije. Rukovanje resursima koji imaju značajnu finansijsku vrednost zahteva visok stepen bezbednosti, koji se delom održava kroz veliku distribuiranost mreže. Mreža u kojoj se nalaze desetine hiljada čvorova može se smatrati visoko distribuiranom i bezbednom od napada u kojima grupa učesnika može da postane maliciozna i preuzme kontrolu nad mrežom [80]. Međutim, kako svaki arhivski čvor sadrži čitavu kopiju baze podataka čija veličina varira od 3 do 20 TB [81], jasno je da količina resursa neophodna za održavanje svih čvorova u mreži nije trivialna. Stoga delimično proizilazi i visoka cena transakcija koje se izvršavaju na Itirijum mreži.

Kako je Itirijum globalna mreža koja je održavana od strane mnogobrojnih učesnika u cilju izvršavanja proizvoljnih aplikacija napisanih u obliku pametnih ugovora, jasno je da je njena arhitektura određena samim dizajnom mreže i da se ne može menjati kako bi se prilagodila individualnim slučajevima upotrebe. Na Slici 3.4 se može videti ilustracija Itirijum arhitekture. Neke od glavnih karakteristika arhitekture iz perspektive ove disertacije su:

- Svi čvorovi na ethereum mreži su identični, ne postoji mogućnost dodele specifičnih uloga čvorovima.
- Broj čvorova koji učestvuju u mreži ne može biti kontrolisan i generalno je pravilo da se teži što većem broju čvorova kako bi mreža bila što distribuiranija.
- Svi učesnici u mreži čuvaju sve podatke i ne postoji mogučnost podele podataka na manje podgrupe.
- Naknada za izvršavanje transakcija plaća u Itirijum nativnoj kriptovaluti i ne postoji mogućnost alternativnog načina za generisanje transakcija koji ne



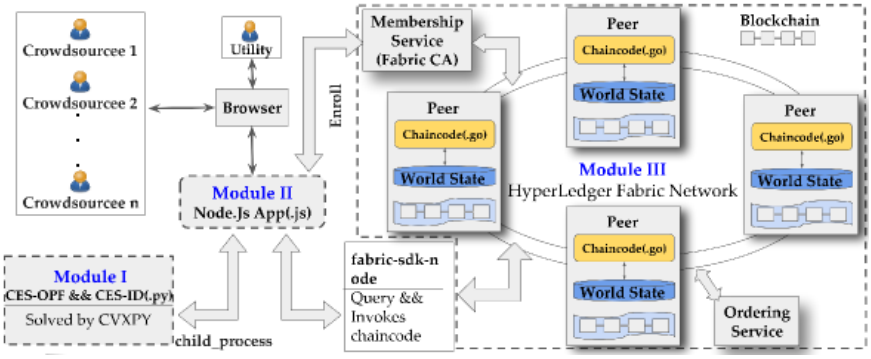
Slika 3.4: Arhitektura Itirijum mreže (slika preuzeta iz [82])

zahteva plaćanje u kriptovaluti.

- Ne postoji mogučnost kontrole pristupa čvorovima. Svi korisnici mogu da pristupe čvorovima, a ukoliko poseduju dovoljnu količinu tokena, mogu da interaguju sa čvorom kroz generisanje transakcija na mreži.

Kako je Itirijum najćešće korišćena tehnologija za implementaciju distribuiranih sistema za trgovanje energijom, arhitekture koje se oslanjaju na nju su opisane u radovima poput [52, 59, 62, 83, 84]. Navedene karakteristike Itirijum mreže sugerišu da arhitekture DLT modula rešenja koja koriste Itirijum tehnologiju za implementaciju distribuiranih sistema za trgovanje energijom moraju biti veoma slične. Svi čvorovi u takvim sistemima moraju imati iste uloge, ne postoji mogučnost dodeljivanja specifičnih uloga čvorovima koji bi rukovali sa mrežnom infrastrukturom. Ne postoji mogućnost kontrole pristupa distribuiranom sistemu implementiranim upotrebom Itirijum aplikacije. Svaki korisnik koji poseduje dovoljnu količinu tokena može da interaguje sa mrežom. Arhitektura mreže onemogućava kontrolu pristupa podacima koji su potpuno javni i visoko dostupni svim učesnicima mreže.

U literaturi se mogu pronaći rešenja koja koriste Hajperledžer Febrik kao tehnologiju za razvoj sistema za trgovanje električnom energijom. Hejperledžer Febrik je mnogo fleksibilnija tehnologija u odnosu na Itrijum i pruža mogućnost formiranja arhitektura koje u mnogim aspektima liče na arhitekturu predloženu u disertaciji. U radu [55] je predstavljena arhitektura koja se sastoji od modula, od kojih se ističu veb modul i Hajperledžer Febrik modul (Slika 3.5). Veb modul sadrži deo logike za trgovanje i korišćen je od strane korisnika za komunikaciju sa Hajperledžer mrežom. Distribuirani Hajperledžer Febrik modul koji se sastoji od više međusobno povezanih čvorova koji

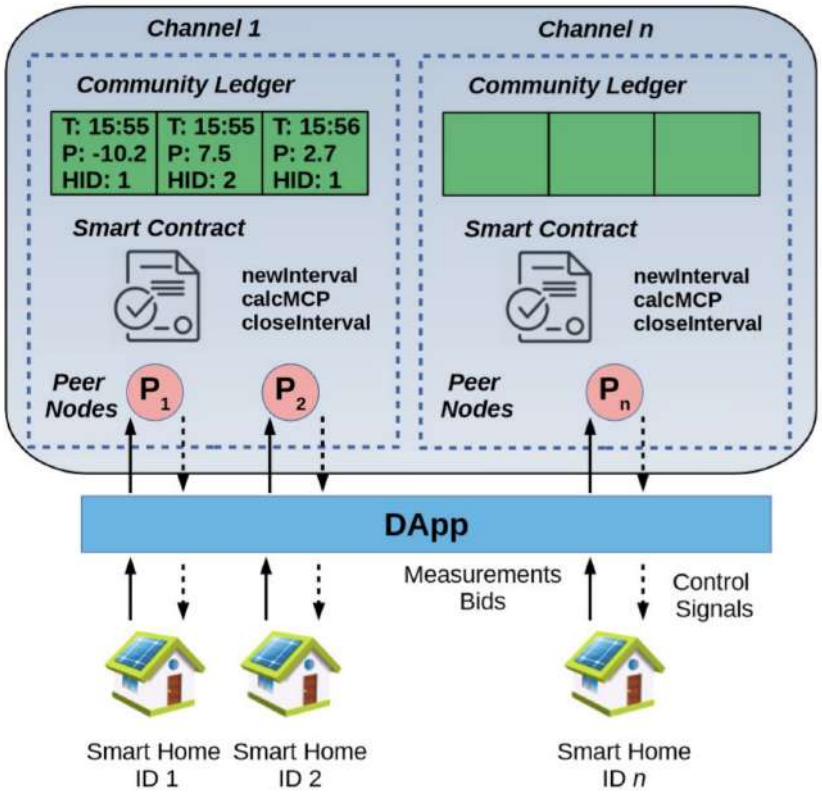


Slika 3.5: Arhitektura bazirana na Hajperledžer Febrik (slika preuzeta iz [55])

čine blokčejn mrežu. Ovakva arhitektura je značajno efikasnija od arhitektura koje su zasnovane na Itirijum tehnologiji. Broj transakcija koje ona može da podrži značajno je veći od većine arhitektura; međutim, postoje i određene mane koje ona uvodi. Svi učesnici u mreži su takođe i učesnici u transakcijama. Ovaj pristup dovodi do brzog zasićenja mreže i nije lako rešiv kao u slučaju arhitekture predložene u disertaciji, gde samo neophodni članovi učestvuju u transakcijama. U radu se opisuje algoritam koji se sastoji od dve faze i koristi se za trgovanje energijom dan unapred, kao i za trgovanje u realnom vremenu. Međutim, deo složene logike dvofaznog algoritma izvršava se od strane centralizovanog veb servera koji nije deo distribuirane mreže, što ograničava bezbednost sistema, stvarajući centralizovanu tačku otkaza koja ne podleže pravilima distribuiranog Hajperledžer sistema.

Saksena i drugi [85] su takođe predstavili rešenje koje koristi Hajperledžer Febrik i osmislili arhitekturu koja ima slične komponente kao arhitektura opisana u [55] (Slika 3.6) . Prednost arhitekture predstavljene u [85] jeste to što koristi kanale da bi podelila celu blokčejn mrežu na nekoliko komšiluka. Svaki komšiluk je deo posebnog kanala koji ima svoj izdvojeni blokčejn. Ovim se omogućava bolje skaliranje mreže tako što nikada prevelik broj korisnika i prozjumera neće učestvovati u transakcijama, čime se konsekventno očuvaju dobre performanse mreže.

Iako arhitektura predstavljena u [85] ima prednosti u odnosu na arhitekturu predstavljenu u [55], obe arhitekture imaju ograničenja u pogledu izbora aktivnih učesnika transakcija i očuvanja privatnosti korisnika. U arhitekturi [55] svi korisnici učestvuju u svim transakcijama, dok u [85] samo članovi jednog komšiluka učestvuju u transakcijama. Međutim, nijedna od pomenutih arhitektura nema mogućnost da samo određenim korisnicima omogući, u određenom trenutku, da budu aktivni deo mreže. Ova mogućnost ima potencijal da smanji aktivan broj učesnika u transakcijama i time smanji potrošnju resursa i vreme izvršavanja transakcija uz očuvanje benefita



Slika 3.6: Arhitektura bazirana na Hajperledžer Febrik uz upotrebu kanala (slika preuzeta iz [85])

koje donosi blokčejn mreža (sve dok aktivan broj učesnika u transakcijama ne padne ispod nekoliko desetina). Dodatno, ukoliko svi čvorovi iz jednog komšiluka ili čitave mreže uvek učestvuju u svim transakcijama svojih komšija, oni mogu imati potpune informacije o potrošnji energije u komšiluku. U slučaju da samo korisnici koji aktivno žele da kupe energiju učestvuju u transakcijama, imamo situaciju u kojoj komšije i dalje mogu da prate potrošnju drugih korisnika iz okruženja, ali u manjoj meri i uz čuvanje samo povremenih informacija o potrošnji svojih komšija.

3.2 Performanse DLT i blokčejn sistema

Iako su se rani pokušaji primene blokčejna u elektroenergetici prvenstveno fokusirali na uvođenje visokih nivoa bezbednosti i postizanje decentralizacije (videti Sliku 3.1),

sve češća upotreba ove vrste distribuiranih sistema u praksi je dovela do toga da performanse postanu veoma važne. Javne blokčejn mreže generalno nisu naročito dobre u brzom procesiranju velikih količina transakcija [86]. Ovaj problem je izazvan njihovim dizajnom i potrebom za održavanjem visokog nivoa bezbednosti i decentralizacije. Vitalik Buterin je uveo koncept poznat kao blokčejn trilema, navodeći da blokčejn sistem može imati samo dva od sledeća tri svojstva — skalabilnost, decentralizaciju i bezbednost [87]. Nedavni napori usmereni na rešavanje ovog problema u okruženju javnih blokčejn mreža uključuju: prelazak na druge, manje računarski zahtevne konsenzus mehanizme [88], particionisanje knjige transakcija [89] ili dodavanje dodatnih nivoa iznad osnovnog lanca blokova [90]. Ova rešenja ne uklanjaju problem ograničenog protoka transakcija i visoke potrošnje resursa, već nastoje da ga ublaže. Budući da su pomenuti problemi, po trenutnoj koncepciji javnog blokčejna, uvek prisutni i ne mogu se u potpunosti eliminisati, razvoj novih tehnologija i pristupa teži da ih u što većoj meri ublaži. Javni blokčejn sistemi često žrtvuju skalabilnost ili određeni nivo bezbednosti, ali retko decentralizaciju. Privatni blokčejn sistemi, s druge strane, dizajnirani su tako da je moguće kontrolisati nivo decentralizovanosti, i time omogućavaju brže izvršavanje transakcija. To kao rezultat pruža privatnim DLT i blokčejn mrežama mogućnost da imaju viši protok transakcija (engl. throughput) i nižu latenciju. Ovakvu tvrdnju potvrđuje [91] kroz detaljno poređenje performansi Itirijuma i Hajperledžer Febrika. Prema [11], prosečan protok transakcija u sekundi za Bitkoin 2024. godine iznosio je samo tri transakcije u sekundi, dok je za Itirijum 2024. godine protok iznosio 12 transakcija u sekundi. Poređenje javnih i privatnih blokčejn mreža samo na osnovu protoka transakcija ne može se smatrati potpuno objektivnim merilom jer se okruženja u kojima se transakcije obrađuju veoma razlikuju i transakcije su suviše heterogene. Ipak, određeni izvori [92–95] navode da Hajperledžer Fabrik i R3 Korda mogu, u izvesnim situacijama, postići hiljade transakcija u sekundi. Pomenuti brojevi u velikoj meri zavise od konfiguracije mreže, broja učesnika, izabranog konsenzus protokola i drugih faktora. Međutim, podaci ukazuju na to da privatne blokčejn mreže sa pravom pristupa treba uzeti u razmatranje prilikom osmišljanja arhitekture sistema i da one mogu imati prednost u performansama u određenim scenarijima. Podrška trgovanju električnom energijom je jedan od scenarija u kome je prihvatljivo žrtvovati decentralizaciju u zamenu za veći protok i manju potrošnju energije.

Nekoliko studija upoređuje performanse nekih od najpopularnijih okruženja (engl. framework) korišćenih za razvoj privatnih mreža sa pravom pristupa. U radu [96] prikazana je evaluacija pet blokčejn sistema: privatno Itirijum okruženje, Hajperledžer Febrik, Kvorum (engl. Quorum), Multičejn (engl. Multichain) i R3 Korda. Svaki od njih dobija konačnu ocenu na skali od 1 do 5. Najvišu ocenu, 4,4, dobio je Hajperledžer Febrik, Itirijum je ocenjen sa 3,3, Korda i Krovum su dobili po 2,2, a Multičejn 2. Iako je predložena metodologija sa eksplicitnim uputstvima za ocenjivanje,

sistem ocenjivanja nije zasnovan na eksperimentalnoj postavci, već na informacijama prikupljenim iz drugih radova. To ne daje objektivan uvid u stvarne performanse ovih blokčejn mreža, pošto podaci potiču iz različitih izvora, eksperimenata i testova. Dodatno, konačna ocena meša tehničke metrike performansi, poput latencije i protoka, sa netehničkim metrikama kao što su aktivnost zajednice na Github-u i Twitter-u, ili stopa komercijalne primene i upotrebe od strane velikih korporacija. Štaviše, broj naučnih radova korišćenih kao izvor informacija nije ujednačen za svih pet blokčejn mreža — za Febrik je korišćeno 8 radova, za Itirijum 6, a za preostala tri po jedan. Stoga se konačne ocene ne mogu smatrati apsolutno relevantnim. Jedini rad korišćen u [96] za evaluaciju R3 Korde jeste [97], u kojem se Korda pokazala najlošije među analiziranim blokčejn mrežama. Blokčejn okviri upoređeni u [97] su Hajperledžer Febrik v0.6, Hajperledžer Febrik v1.0, Ripl (engl. Ripple), Tendermint i R3 Korda. Verzija Korde korišćena u ovoj evaluaciji je v3.2, sa Raft konsenzusom za notare. Svaki okvir skaliran je na oko 30 čvorova, osim Korde, koja nije mogla da podrži više od 4. Testirana verzija Korde (v3.2) je iz 2018. godine i odlikuju je izuzetno loše performanse, a novije verzije Korde postižu mnogo bolje rezultate, uz bolju skalabilnost i ukupne performanse [93].

Radovi [97–99] sadrže dobro opisanu eksperimentalnu postavku i metodologiju, te daju temeljitije poređenje privatnih blokčejn rešenja nego [96]. Ujedno, [97] se ne fokusira na upoređivanje različitih blokčejn mreža, već na merenje njihovih mogućnosti skaliranja, koje su, pre nekoliko godina, bile znatno lošije nego danas. S druge strane, [98] i [99] zaista upoređuju različite privatne blokčejn mreže. U oba rada se Hajperledžer Febrik pokazuje kao najbolje rešenje po ukupnim performansama. Metodologija iz [99] omogućava merenje latencije, protoka, ukupnog vremena izvršavanja grupe transakcija i maksimalnog broja istovremenih transakcija. Metodologija se sastoji od četiri glavna modula. Prvi modul se koristi za postavljanje infrastrukture neophodne za pokretanje čvorova mreže i ostvarivanje komunikacije između čvorova. Drugi modul se koristi za konfiguraciju mreže u cilju podešavalja resursa na mreži neophodnih za pokretanje eksperimenata. Treći modul se koristi za pokretanje eksperimenata i određivanje intenziteta i načina pravljenja transakcija na mreži. Četvrti modul se koristi za prikupljanje podataka, kao što su vreme izvršenja transakcije i protok transakcija u sekundi. U predstavljenom radu [99], ova metodologija upoređuje privatnu Itirijum instancu i Hajperledžer Febrik, posmatrajući njihovo ponašanje kada se povećava broj zahteva poslatih na obradu blokčejnu. Jedini segment u kojem Itirijum postiže bolje rezultate jeste broj istovremenih transakcija koje može da obradi, dok Hajperledžer Febrik ima znatno bolje rezultate u pogledu latencije, protoka i ukupnog vremena izvršavanja. Rezultati u [98] su veoma slični, ali su eksperimenti ovde nešto širi. U [98] se porede četiri DLT mreže: Hajperledžer Febrik, privatni Itijijum, R3 Korda i Kvorum. Eksperimenti variraju kako po broju transakcija, tako i

po broju uključenih čvorova. Hajperledžer Febrik se ponovo pokazao najboljim, iako je pokazao ograničenja po pitanju skaliranja. Može da se skalira do 16 čvorova uz 1000 istovremenih transakcija, i samo do 4 čvora uz 10000 transakcija, dok druge blokčejn mreže mogu obraditi više čvorova. Kao druga najbolja ocenjena je R3 Korda. U ovom radu je takođe prikazan značajan napredak u performansama Korde ostvaren u samo tri uzastopne verzije (v4.3, v4.4, v4.5). Iako je druga po redu, Korda nije daleko od Hajperledžer Febrika i čak pokazuje bolji protok kada je broj istovremenih transakcija oko 10. Rezultati iz [98] dokazuju da R3 Korda danas radi znatno bolje nego što je to bio slučaj u ranijim verzijama ocenjivanim u radovima [96] i [97].

Kada se govori o alatima za testiranje performansi blokčejna, [100] daje dobar pregled postojećih rešenja koja se mogu koristiti u te svrhe. Neki od pomenutih alata su Blokbenč (engl. BlockBench) [101], BCTMark [102] i Hajperledžer Kaliper (engl. Hyperledger Caliper) [103]. Blokbenč (engl. BlockBench) [101] je alat za testiranje performansi privatnih blokčejn mreža i meri latenciju, protok, skalabilnost (kako se latencija i protok menjaju dodavanjem novih čvorova) i otpornost na kvarove (kako se latencija i protok menjaju pri otkazu čvora). U momentu pisanja rada [101], alat Blokbenč je podržavao Hajperledžer Febrik, privatne Itirijum instance i Pariti (engl. Parity). Kasnije je proširen i, prema navodima na zvaničnom GitHub repozitorijumu [1] Blokbenča, podržava više verzija Hajperledžer Febrika, privatni Itirijum, Pariti i Kvorum. Mana Blokbenča je to što se bazira na merenju performansi konekcijom na API blokčejn mreže, što ga ograničava na merenje performansi poput protoka vremena i latencije i ne pruža mogućnosti merenja potrošnje računarskih resursa i električne energije. Blokbenč i dalje ne podržava Korud. BCTMark [102] je još jedan alat za testiranje performansi različitih blokčejn platformi. Može da meri mrežne parametre kao što su latencija i protok, kao i parametre infrastrukture, poput potrošnje energije i upotrebe CPU-a. Razvijen je tako da apstrahuje i infrastrukturu i blokčejn sistem za koji se koristi, što ga čini prenosivim na različite uređaje i ponovo upotrebljivim za različite blokčejn mreže. Prvobitno je podržavao Itirijum Ethash, Itirijum Clique i Hajperledžer Febrik. Za korišćenje s drugim blokčejn mrežama, potrebno je implementirati odgovarajući drajver. Hajperledžer Kliper (engl. Hyperledger Caliper) [103] je alat koji se trenutno može koristiti za testiranje performansi Hajperledžer Besua (engl. Hyperledger Besu), Hajperledžer Fabrika v1.x i v2.x, Itirijuma i FISCO BCOS. Može meriti protok i latenciju za operacije čitanja i pisanja, kao i potrošnju resursa, poput CPU-a, memorije i mrežnog ulaza i izlaza.

Iz opisa gore navedenih alata jasno je da nijedan ne podržava R3 Kordu. U zvaničnoj dokumentaciji za Kordu postoje određene informacije o prikupljanju korisnih podataka o karakteristikama mreže, izvršavanju čvorova i praćenju sistema. U [104] je dat spisak atributa Korda čvora, pri čemu se svaki od njih može koristiti za nadgledanje

[1] https://github.com/ooibc88/blockbench, poslednji put posećen 22. februara 2025.

specifičnog dela izvršavanja čvora. Takođe, u [105] je opisan test slučaj koji koristi Korda-adaptiran omotač za Apač JMeter (engl. Apache JMeter) u svrhu testiranja izvršavanja transakcija i merenja protoka transakcija.

Svi opisani alati zahtevaju dodatne korake u podešavanju ili implementaciju drajvera i ne mogu se koristiti odmah za merenje performansi proizvoljnih R3 Korda mreže. Zbog toga je doneta odluka da se primeni sopstvena eksperimentalna postavka i napišu prilagođeni algoritmi i skripte za praćenje metrike Korda tehnologije. Detalji tih merenja i eksperimentalnog postupka opisani su u Poglavlju 6.

3.2.1 Merenje potrošnje energije

Uticaj blokčejna na klimu i životnu sredinu postao je tema od velikog interesovanja. Rezultati istraživanja iz [106–108] pokazuju da rane blokčejn platforme koje koriste PoW kao konsenzus algoritam nisu naročito energetski efikasne. Proračuni iz [106,107] predviđali su da bi se u 2020. godišnja potrošnja energije za Bitkoin kretala između količine energije koju Austrija i Norveška potroše godišnje (u rasponu od 75 GWh do 125 GWh). Podaci dostupni u [109] pokazuju da ova predviđanja nisu bila daleko od stvarnog stanja i da se potrošnja energije za Bitkoin dodatno povećala u odnosu na onu izmerenu 2020. Kako je opisano u [106, 107], drugi blokčeinovi koji koriste PoW algoritam troše nešto manje energije od Bitkoina, ali je njihova potrošnja i dalje veoma visoka. Iako takvo ponašanje nije poželjno, [106] tvrdi da je potrošnja rezultat toga što je PoW dizajniran da bude računarski intenzivan kako bi se održao visok nivo bezbednosti. Ova tvrdnja jeste istinita, međutim, PoW nije jedini konsenzus algoritam koji pruža visok stepen bezbednosti.

Mnogi drugi konsenzusni protokoli su daleko efikasniji u pogledu potrebne energije, kao što je PoS [51], ili drugi mehanizmi koji su manje restriktivni i koriste se u privatnim blokčejn mrežama sa kontrolom pristupa, poput PBFT [106–108]. Novija istraživanja takođe ističu da čak i u blokčejn sistemima zasnovanim na PoS (Itirijum mreža je nedavno prešla na PoS [88]) i dalje postoje primetni troškovi energije zbog potrebe za kontinuiranim radom velikog broja čvorova. Ipak, empirijski podaci dosledno pokazuju da bilo koji dobro optimizovan PoS blokčejn smanjuje potrošnju energije za više redova veličine u odnosu na PoW mreže, ponekad dostižući smanjenje i preko 99% [110]. Štaviše, tekuća istraživanja vezana za skaliranje Itirijum mreže nakon uvođenja PoS algoritma su usmerena na rešenja sloja-2 [111, 112]. Oni su osmišljeni u cilju smanjenja računarskog opterećenja osnovnog sloja i konsekventnim smanjenjem cene transakcija. Prebacivanjem većine transakcija van glavnog lanca, ova rešenja mogu smanjiti potrebu za energijom na glavnom lancu, a pri tom zadržati veliki propusni opseg i sigurnost. Ovaj pristup korišćenja drugog sloja Itirijum mreže ima potencijal da dodatno smanji potrošnju Itirijum mreže. Primer rešenja drugog sloja su optimistični rolapi (engl. optimistic rollups) [113] i ZK rolapi (engl. zero

knowledge rollups) [114]. Nažalost, za sada nisu pronađena kvalitetna istraživanja koja se bave temom potrošnje energije Itirijum rešenja drugog sloja.

U [108] dat je pregled različitih konsenzus protokola, uz kratku analizu njihove energetske efikasnosti. Pored konsenzus mehanizama, na količinu potrebne energije utiče i redundansa prisutna u sistemu. Ona može biti prikazana kao računarska redundansa (broj čvorova koji učestvuju u računarskim zadacima u mreži) i skladišna redundansa (broj replika podataka) [106]. U određenim privatnim blokčejnovima koji se koriste u kompanijama, nije neophodno da svi čvorovi potvrđuju svaku transakciju, a podaci se ne repliciraju nužno na svim čvorovima. To dovodi do toga da su blokčejn sistemi namenjeni za kompanije energetski efikasniji od javnih [106]. Ovakvo ponašanje važi i za R3 Kordu koja je privatni DLT sa kontrolom pristupa, čiji čvorovi ne čuvaju celu istoriju distribuirane glavne knjige, već samo podatke koji su im od interesa. Pored toga, u Kordi se konsenzus za transakciju postiže samo među zainteresovanim stranama, a ne u celoj mreži. Sve ovo ukazuje da je potrošnja energije kod Korda čvorova niža nego kod javnih blokčejn mreža bez prava pristupa. Poređenje potrošnje energije Korda sistema sa drugim blokčejn sistemima poput Bitkoina, Itirijuma i Polkadota nalazi se u [115]. Iako potrošnja energije zavisi od mnogo faktora kao što su: obim posla, broj učesnika u mreži i korišćena infrastruktura, rezultati u [115] pokazuju da je količina energije koju Korda troši značajno niža u poređenju sa Itirijumom, Bitkoinom i Polkadotom. Konkretni radovi koji istražuju energetsku potrošnju Korda mreže u eksperimentalnom okruženju nisu uspešno pronađeni, međutim izveštaj [116] razmatra potrošnju električne energije različitih blokčejn tehnologija, uključujući DLT mreže sa pravom pristupa poput Korde. U njemu se ističe da takve mreže, zahvaljujući kontrolisanom pristupu i efikasnim konsenzusnim protokolima, troše manje energije od svojih javnih pandana. Međutim, izveštaj ne sadrži konkretne brojke koje potvrđuju date tvrdnje.

Poglavlje 4

Distribuirana softverska arhitektura za podršku trgovanju energijom

Ovo poglavlje se sastoji od četiri sekcije. U prvoj sekciji predstavljena je arhitektura predloženog softverskog sistema za podršku trgovanju energijom, njegova svrha, kao i najčešći slučajevi upotrebe. Nakon toga, sledi opis grupe učesnika koji su identifikovani kao članovi distribuirane mreže. Detalji arhitekture su potom razmatrani u trećoj sekciji. U četvrtoj sekciji detaljno su prikazane funkcionalnosti DLT podsistema za podršku trgovanju energijom, uz analizu detalja P2P komunikacije između članova mreže.

4.1 Struktura i ciljevi arhitekture

Za potrebe istraživanja se koristi softverski kreirano okruženje za trgovanje energijom koje je koncipirano i postavljeno tako da, u što je moguće većoj meri, bude istovremeno i realistično i relativno jednostavno. Jednostavnost navedenog softverskog okruženja ima za cilj da učini arhitekturu i prototip sistema koji je u skladu sa njom implementiran lakšim za razumevanje. Ključna odlika okruženja je pretpostavka da postoji jedno nadzorno telo (engl. grid authority) koje kontroliše jednu mrežu, i ta mreža povezuje sve učesnike sistema. Mreža takođe ima jednog ili više distributera električne energije, gde se često uloga distributera i nadzornog tela obavljaju od strane iste kompanije. Taj distributer koji je u predloženoj arhitekturi nazvan elektrodistribucijom, će takođe služiti i kao krajnji snabdevač električne energije (u slučaju da svi ostali mehanizmi za snabdevanje ne uspeju da proizvedu energiju). Prethodno opisano okruženje je u velikoj meri slično stvarnom stanju na terenu u mnogim delovima sveta gde su do nedavno regionalne ili državne elektroenergetske kompanije imale *de facto* monopol. Arhitektura pored distributera i nadzornih tela predviđa i druge proizvođače, prozjumere i veliki broj potrošača. Okruženje koje je uzeto kao početna tačka pri razvoju arhitekture u velikoj meri odgovara onome što se može očekivati u ranim fazama razvoja distribuiranih elektroenergetskih mreža.

Problemi koje svaki sistem za trgovanje energijom mora adekvatno da reši uključuju visoku cenu skladištenja energije, neizbežne gubitke i ograničenost kapaciteta. Dodatno, fizičke karakteristike mreže su takve da ulaz električne energije u mrežu mora

biti jednak izlazu energije iz mreže u realnom vremenu. Dakle, u svakom trenutku ne sme doći do manjka ili viška energije u sistemu jer to dovodi do pada kvaliteta električne energije koji na kraju može izazvati delimične ili potpune prekide snabdevanja električnom energijom, pa čak i kolaps mreže. Implikacija pomenutih ograničenja elektroenergetske mreže na trgovanje energijom je da postaje prirodno trgovati fjučersima (engl. futures) električne energije. U finansijskom smislu reči, fjučersi su finansijski ugovori kojima se kupac i prodavac obavezuju da će u budućnosti izvršiti isporuku određene robe ili sredstava po unapred dogovorenoj ceni. Trgovina fjučersima u predloženom sistemu se sastoji od jedne grupe učesnika koji obećavaju da će isporučiti određenu količinu energije u mrežu i druge grupe korisnika koji pružaju obećanje da će potrošiti tu količinu energije. Kako stabilnost sistema zavisi od ispunjenja datih obećanja, postavlja se sledeće pitanje: šta raditi u slučajevima kada se obećanja ne ispune? Dakle, softversko rešenje koje podržava trgovanje električnom energijom mora da ima osiguravajuće mehanizme koji čuvaju stabilnost mreže tako da destimulišu učesnike da krše svoja obećanja. U predloženom rešenju mrežno nadzorno telo (MNT) je zaduženo za kontrolisanje stabilnosti elektroenergetske mreže. Njegova uloga je da skladišti (ili ukloni) višak energije u sistemu. A u slučaju nedostatka energije, otkupi je od velikih proizvođača ili elektroprivrede po povećanim cenama.

Pouzdana i skalabilna tehnologija za skladištenje energije je predmet intenzivnog istraživanja. Kako se ona bude razvijala tako će se povećavati i efikasnost sistema za distribuirano trgovanje energijom. U sadašnjem sistemu, pružalac skladišta energije funkcioniše slično kao prozjumeri, jer "troši" električnu energiju (skladištenjem) i "proizvodi" je (oslobađanjem iz skladišta). Takvi učesnici, iz perspektive softverskog sistema za podršku trgovanju energije, funkcionišu isto kao i drugi prozjumeri, ali je njihova uloga iz perspektive stabilnosti mreže i ekonomskih inicijativa drugačija. Oni obezbeđuju stabilnost i likvidnost tržišta koja je u direktnom odnosu sa skladišnim kapacitetom mreže i efikasnošću sistema za skladištenje energije [117]. U trenutnoj situaciji, pre pojave prikladne tehnologije koja je u stanju da skladišti energiju na industrijskom nivou i bez upotrebe specifično izgrađene infrastrukture, učesnici na tržištu trgovanja energijom zapravo ne mogu slati energiju jedni drugima. Po prirodi rada elektroenergetskih mreža, oni samo mogu poslati ili primiti energiju sa mreže.

Kako bi se moglo trgovati električnom energijom u predloženoj arhitekturi neophodno je napraviti **energetsko obećanje** (EO). Svako ko proizvodi energiju u okviru sistema može da napravi ovakvo obećanje. EO predstavlja obećanje u okviru sistema da će se proizvesti i isporučiti određena količina energije u datom vremenskom periodu. Ovo obećanje može biti predmet trgovine koja se u predloženoj arhitekturi realizuje putem aukcijske prodaje. Kada je transakcija pravljenja energetskog obećanja završena, to znači da je proizvođač (ili prozjumer) dao obećanje da će isporučiti određenu količinu energiju tokom datog vremenskog perioda. Sa druge strane, ukoliko neko kupi EO,

on obećava da će prihvatiti tu energiju u datom vremenskom okviru. Ako obe strane ispune svoj deo dogovora, to znači da je transfer uspešan i da se odgovarajući iznos novca prenosi unutar sistema od potrošača ka proizvođaču. Ako bilo koja strana prekrši obećanje, MNT preuzima kontrolu nad ishodom transakcije, vrši stabilizaciju mreže i kažnjava učesnika koji nije ispunio svoj deo obećanja. Pomenuti mehanizam nadzornog tela je neophodan za nesmetano funkcionisanje mreže, ali treba ga izbegavati u što većem broju slučajeva jer zahteva skupo održavanje neiskorišćenih ali momentalno dostupnih kapaciteta za proizvodnju ili skladištenje energije koji se koriste kako bi se mreža stabilizovala. Što se energetska obećanja češće krše, to neiskorišteni kapacitet proizvodnje energije mora biti veći (kako bi se pokrio nedostatak). Ovakve akcije nameću stvarne i oportunitetne troškove mreži, zbog čega treba obeshrabriti slučajeve u kojima se energetska obećanja ne ispunjavaju. Stoga je potrebno osigurati dve stvari: ograničenje energije koju prodavac može da obeća u energetskom obećanju (ograničenje rizika), kao i uvođenje mehanizma koji destimuliše proizvođače da prave obećanja koja nisu u stanju da ispune. Oba ograničenja se mogu ispuniti korišćenjem sistema depozita.

Mrežno nadzorno telo ima unapred poznat cenovnik za hitno snabdevanje energijom po kWh koju je neophodno obezbediti u momentima kada proizvođač ne ispuni energetsko obećanje koje je napravio. Formirana cena pokriva sve troškove električne energije i upravljanja mrežom. Ona je i dodatno povećana kako bi bila snažan ekonomski podsticaj da se ne daju obećanja koja se razumno ne mogu ispuniti. Kao deo mehanizma za pravljenje energetskog obećanja, proizvođač mora položiti depozit u iznosu ukupne kazne koju bi platio u slučaju da ne isporuči obećanu količinu energije. Pomenuti depozit predstavlja garanciju da će se obećana energija izručiti i platiti, čak i u slučaju kada proizvođač ne ispuni obećanje. Depozit takođe smanjuje šansu da se obmana dogodi upotrebom jake ekonomske destimulacije koja osigurava da proizvođač gubi mnogo više novca u slučaju da ne ispuni obećanje (gubi sav novac koji je uplatio kao depozit) u poređenju sa zaradom koju ostvaruje ako obećanje ispuni. U slučaju da obećanje bude ispunjeno, od depozita se odbijaju naknade za usluge održavanja mreže, a preostali deo depozita će biti vraćen. Ovako postavljen sistem za podršku trgovanja energijom omogućava potrošačima da kupe energiju po manjoj ceni od podrazumevane cene koju nude tradicionalne elektroenergetske kompanije. Takođe, što je još važnije, omogućava proizvođačima i prozjumerima da prodaju višak svoje energije po cenama koje su najčešće više od nominalne naknade koju bi inače dobijali.

Predloženi distribuirani softverski sistem za podršku trgovanju električnom energijom baziran na DLT donosi proširenje mogućnosti u odnosu na tradicionalne centralizovane sisteme u smislu efikasnog praćenja izvora električne energije koja se trenutno prodaje na tržištu. Ova funkcionalnost omogućuje korisnicima sistema da

pored fleksibilne cene energiju mogu da biraju i izvore iz kojih je energija proizvedena. Time se korisnicima otvara mogućnost da glasaju svojim novcem i, ukoliko to žele, plate električnu energiju skuplje kako bi podržali proizvođače energije koji koriste obnovljive izvore. Kako je izvor koji se koristi za proizvodnju električne energije informacija kojom bi se moglo svesno manipulisati u cilju stvaranja lažne slike o proizvodnji zelene energije u slučajevima kada to nije istina, pojavljuje se potreba za verifikacionim agencijama čija je uloga u sistemu da kontrolišu istinitost informacija o izvorima električne energije.

Verifikacione agencije su slične mrežnom nadzornom telu po tome što i one zahtevaju poverenje od strane korisnika softverskog sistema da bi pravilno funkcionisale. Međutim, bitna razlika je u tome što je MNT centralizovani organ kome svi moraju verovati od početka, dok verifikacione agencije mogu postepeno da stiču poverenje korisnika i može ih biti više u sistemu. Verifikacione agencije potvrđuju tvrdnje od strane proizvođača koje se tiču izvora i metoda korišćenih za proizvodnju električne energije. One bi trebale da vrše povremenu proveru proizvođača u realnom svetu i potvrde ili opovrgnu tvrdnje koje proizvođači navode. Loše obavljene provere mogu dovesti do pogrešnih rezultata verifikacije, što bi smanjilo nivo poverenja koje su ostali učesnici spremni da daju verifikacionoj agenciji. Stoga, ove agencije nemaju interes da obmanjuju ostatak mreže, jer bi to rezultiralo smanjenjem kredibiliteta agencije. Dakle, verifikacione agencije su suštinski veza između realnog sveta i softverskog sistema koji se koristi za podršku trgovanju energijom i direktno su uključene u proces pravljenja pametnih obećanja.

4.2 Učesnici u mreži

Arhitektura sistema se sastoji od sledećih grupa učesnika:

- **Mrežno nadzorno telo** (engl. grid authority) - institucija odgovorna za mrežu i za nadzor senzora povezanih s njom. Iako činjenica da je to jedan entitet kome svi veruju može biti u suprotnosti sa duhom decentralizacije sistema, u većini slučajeva postoji samo jedna mreža i samim tim jedna institucija odgovorna za nju. Stoga, decentralizacija svih funkcija uprave i nadzora mreže trenutno nije moguća. Međutim, decentralizovana priroda DLT rešenja otvara mogućnost za sprovođenje budućih organizacionih promena koje bi dovele do veće decentralizacije mrežnog nadzornog tela.
- **Elektroprivreda** (engl. power company) - mrežno nadzorno telo je odgovorno samo za mrežu i njen nadzor. Elektroprivreda, s druge strane, predstavlja komercijalno preduzeće koje se bavi proizvodnjom energije ili njenom kupovinom na veliko od drugih proizvođača (ili oba). Elektroprivreda obično prodaje energiju korisnicima po unapred određenim cenama. U predloženoj arhitekturi se pretpostavlja da elektroenergetski sistem nije monolitan, te da je uloga

elektroprivrede razdvojena od uloge mrežnog nadzornog tela.

- **Proizvođač** (engl. producer) - preduzeće koje se primarno bavi proizvodnjom električne energije. Proizvođači mogu biti različite veličine, od relativno malih (najčešće koriste obnovljive izvore energije), do velikih termo elektrana. Proizvođači obično imaju ugovore o masovnoj prodaji sa elektroprivredom, te ne moraju biti deo DLT mreže. Međutim, oni takođe mogu da prave energetska obećanja i tako učestvuju u mreži kao ravnopravni članovi koji mogu da prodaju veliku količinu energije.
- **Prozjumer** (engl. prosumer) - za razliku od proizvođača, prozjumer je privatno lice, a ne preduzeće, i bavi se proizvodnjom male količine energije prvenstveno za ličnu upotrebu, dok višak želi da proda. Osnaživanje prozjumera, tj. olakšavanje i podsticanje korisnika da postanu prozjumeri jedan je od glavnih ciljeva koji su uticali na dizajn arhitekture sistema.
- **Korisnik** (engl. cusomer) - privatno ili pravno lice koje ima potrebu za električnom energijom i želi da je kupi.
- **Skladište energije** (engl. energy storage provider) - u mnogim aspektima podsećaju na prozjumera. Oboje mogu kreirati i trgovati energetskim obećanjima. Razlika između njih leži u načinu na koji se ovo ponašanje odražava u stvarnom svetu. Za razliku od prozjumera, pružaoci skladišta energije ne koriste energiju za lične potrebe. Umesto toga, energiju koju kupuju skladište na neki način. Kasnije, trgujući tom skladištenom energijom mogu kreirati energetska obećanja. Ovo im omogućava da, s jedne strane, značajno poboljšaju likvidnost sistema i stabilnost mreže, a s druge strane ostvare ekonomske koristi kupovinom energije kada je ima u izobilju i prodajom kada dođe do manjka energije.
- **Verifikaciona agencija** (engl. verification agency) - vodi računa o tome da su informacije o izvorima koji se koriste za proizvodnju energije validni. Verifikacione agencije su bazirane na reputaciji i imaju za cilj da što verodostojnije prenose informacije iz realnog sveta u DLT softverski sistem.
- **Trgovac energijom** (engl. speculator) - učestvuje u mreži isključivo radi ostvarivanja profita. To čini trgovanjem postojećim energetskim obećanjima. Trgovina se na prvi pogled ne razlikuje mnogo od prozjumera ili čak skladišta energije. Međutim, prozjumeri i energetska skladišta mogu kupiti energetsko obećanje i čekati isporuku energije bez snošenja posledica, dok je to trgovcima zabranjeno. Trgovci mogu samo kupovati i kasnije preprodavati energetska obećanja. Oni ne mogu konzumirati energiji i nemaju fizičku konekciju na mrežu. Takođe, trgovci ne mogu kreirati energetska obećanja jer se ne mogu ponašati kao proizvođači. Pored toga, uvode se dodatne restrikcije za trgovce kako bi se ograničila dozvoljena količina energetskih obećanja kojom trgovci mogu rukovati. Ovo bi trebalo da spreči trgovce da dominiraju tržištem i

onemogući neometanu kupovinu energetskih obećanja pojedincima koji žele da trguju energijom za svoje privatne i poslovne potrebe.

4.3 Arhitektura sistema

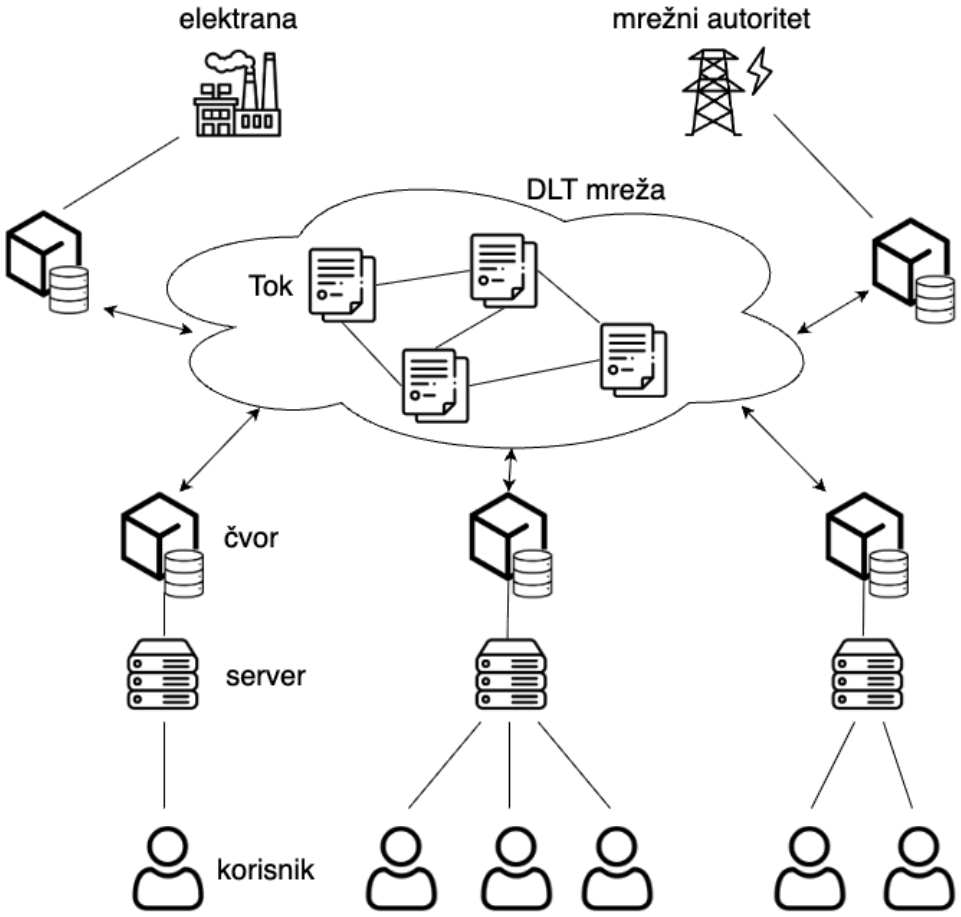
Ova sekcija se bavi softverskom arhitekturom predloženog sistema koji se koristi za podršku trgovanju električnom energijom pod pretpostavkom da je već omogućeno praćenje potrošnje i proizvodnje energije pomoću pametnih mernih uređaja koji su povezani na fizičku elektroenergetsku mrežu. Uzimajući u obzir modernizaciju elektroenergetskih mreža, pametni merni uređaji sve češće postaju deo infrastrukture mreža, posebno u slučajevima prozjumera koji neizbežno moraju da modernizuju svoju mrežnu infrastrukturu.

Arhitektura softverskog sistema sastoji se od dva osnovna podsistema, što je prikazano na Slici 4.1. Prvi podsistem predstavlja osnovu rešenja i koristi DLT tehnologiju. Drugi podsistem je baziran na konvencionalnoj veb tehnologiji i služi kao omotač oko jezgra DLT sistema. Osnovna uloga drugog podsistema je pružanje lakog pristupa prvom podsistemu koji koristi DLT tehnologiju.

DLT podsistem predstavlja skup protokola implementiranih putem specijalizovanog softvera koji omogućava bilo kojem broju nezavisnih računarskih sistema, stvarnih ili virtualizovanih, da učestvuju u jednoj mreži. Softver pomaže u skladištenju podataka i obradi transakcija (promeni stanja) u sistemu. Računar koji na sebi ima instaliran relevantan softver i protokole naziva se „čvor“ i predstavlja osnovni element DLT sistema. U predlogu arhitekture, svaki učesnik u sistemu održava najmanje jedan svoj čvor, koji je pod njegovom potpunom kontrolom i garantuje da se nijedna promena koja se tiče tog učesnika ne može izvršiti u sistemu bez saglasnosti tog učesnika. Promena pored saglasnosti učesnika mora i poštovati unapred definisana pravila sistema. Ova komunikacija se odvija bez centralizovanog servera koji bi predstavljao glavni izvor relevantnih informacija. Umesto toga, sistem se održava i menja svoja stanja kroz organizovanu komunikaciju učesnika mreže koji komuniciraju u P2P maniru.

Za potrebe predložene arhitekture identifikovano je sledećih osam glavnih klasa učesnika: mrežno nadzorno telo, elektroprivreda, proizvođač, potrošač, prozjumer, skladište energije, verifikaciona agencija i trgovac energijom.

Čvor s najviše odgovornosti je MNT zbog njegove ključne uloge u upravljanju samom elektroenergetskom mrežom, posebno u premošćavanju jaza između digitalnog i fizičkog sveta. Podrška trgovanju energije, koja na kraju zahteva isporuku i potrošnju, se realizuje uz upotrebu predloženog MNT čvora. Međutim, kompletna digitalna podrška bi bila beskorisna ako ne bi postojao način da se utvrdi da se ono što je dogovoreno i plaćeno u digitalnom sistemu zaista dogodilo u stvarnosti. U predloženoj arhitekturi, MNT je maksimalno centralizovano radi performansi i jednostavnosti. MNT prikuplja informacije o svim interakcijama sistema sa stvarnošću i služi kao



Slika 4.1: Arhitektura sistema na visokom nivou apstrakcije

prozor u svet softverskom sistemu. Podsekcija 4.5.1 sadrži detalje o tome kako se ovo može unaprediti da bi se ograničila moć jedinog centralizovanog dela sistema.

Čvor elektroprivrede ima uglavnom sekundarnu važnost u DLT sistemu trgovanja energijom, ali je ključan za funkcionisanje sistema. Njegovo ponašanje pri kupovini i prodaji energije kao podrazumevanog snabdevača pruža garanciju kontinuiteta mreže i pomaže pri stabilizaciji kvaliteta električne energije. Elektroprivreda takođe postavlja osnovnu cenu na tržištu, što pomaže ostalim prozjumerima pri određivanju cene energije koju prodaju.

Proizvođači su ključni za mrežu i u digitalnom sistemu njihova uloga je proizvodnja

i prodaja energetskih obećanja. U predlogu arhitekture, tipičan profil proizvođača koji učestvuje ne samo u mreži već i u DLT sistemu najčešće je malo preduzeće koje proizvodi obnovljivu energiju u skromnim razmerama.

Čvor potrošača učestvuje u sistemu kao krajnji korisnici električne energije i njihova uloga je da budu finalni kupac energetskih obećanja kako bi obezbedili energiju za ličnu ili komercijalnu upotrebu. U DLT sistemu, njihova specifična uloga je učestvovanje na aukcijama energetskih obećanja radi kupovine povoljnije energije. Zahvaljujući verifikacionim agencijama i softverskom sistemu koji ima informacije o izvoru proizvedene energije, korisnik može da izabere izvore iz kojih je energija proizvedena pre same aukcijske kupovine.

Čvorovi prozjumera mogu u DLT mreži da se ponašaju kao proizvođači ili kao potrošači (u odnosu na njihove trenutne potrebe). Oni predstavljaju sve veći broj učesnika elektroenergetske mreže koji su tradicionalno samo trošili energiju, ali sada imaju kapacitete za proizvodnju obnovljive energije. U većini slučajeva koriste energiju koju proizvedu, ali u slučaju viška, mogu je prodati. Kada proizvedena energija nije dovoljna za njihove potrebe, oni kupuju dodatnu energiju na isti način kao i bilo koji drugi korisnik mreže.

Čvorovi verifikacione agencije su opcioni i mreža može da funkcioniše i bez njih. Međutim, bez njihovog postojanja nije moguće potvrditi informacije koje proizvođači i prozjumeri postavljaju pri pravljenju energetskih obećanja, a tiču se izvora koji su korišćeni da se električna energija proizvede. Broj čvorova verifikacionih agencija koji se može nalaziti u mreži je takođe proizvoljan. Poverenje koje svaka verifikaciona agencija uživa je bazirano na reputaciji. Stoga, postojanje više agencija je poželjno pošto dovodi do konkurencije i forsira ih da dodatno vode računa o svojoj reputaciji.

Za razliku od verifikacionih agencija koje nisu neophodne za rad mreže (ali su poželjne pošto obogaćuju distribuirani sistem pouzdanim informacijama), čvorovi trgovaca energijom su potpuno proizvoljni članovi predložene DLT arhitekture. Oni su tu isključivo radi povećanja profita prilikom trgovanja. Prozjumeri i proizvođači često žele brzu trgovinu energijom i spremni su da žrtvuju deo profita radi jednostavnosti upotrebe sistema kroz brzu prodaju EO trgovcima. Oni bi otkupljivali energetsko obećanje odmah nakon njegovog pravljenja i kroz dalju aukcijsku trgovinu pokušavali da ostvare profit kroz prodaju obećanja potrošačima koji bi zapravo trošili energiju.

Čvorovi skladišta energije se iz perspektive softverskog sistema za podršku trgovanju energijom ponašaju identično prozjumerima. Glavna razlika je u tome što oni otkupljuju višak energije u momentu prekomerne proizvodnje i prodaju je kasnije u momentima visoke potražnje. Najčešći slučaj kada bi se energija skladištila je sredina dana kada je proizvodnja solarnih panela na vrhuncu, a potrošnja je mala. Dok bi se energija kasnije prodavala u večernjim časovima kada prestaje proizvodnja iz obnovljivih izvora, a potražnja kreće da raste.

4.3.1 Optimizacija broja čvorova

Korisnici koji upravljaju čvorovima pristupaju im putem veb servera. Direktan pristup DLT čvorovima zahteva posebnu konfiguraciju i nije pogodan za upotrebu od strane većine korisnika. Stoga se veb serveri koriste kao lak način da se pristupi čvorovima. Arhitekturalno je moguće obezbediti korisnicima pristup na dva različita načina. Prvi način je povezati svaki DLT čvor sa posebnim veb serverom. Alternativa je koristiti jedan veb server za pristup grupi čvorova. U idealnom scenariju bi bilo poželjno da postoji poseban veb server za svaki DLT čvor, međutim, taj pristup povećava kompleksnost i cenu održavanja sistema. Predlog arhitekture predviđa da se jedan veb server koristi za pristup grupi DLT čvorova. Najveće mane ovog pristupa su smanjena bezbednost i centralizacija sistema koji je pretežno decentralizovan. Međutim, ukoliko se prilikom implementacije veb servera poseban fokus stavi na bezbednost i ograniči broj čvorova koji su povezani na jedan server, onda mane ovog pristupa postaju prihvatljive, a čvorovi koji koriste isti veb server mogli bi se logički i bezbednosno grupisati. Na taj način dobija se dobar balans između operativnih troškova, performansi i bezbednosti celog sistema.

Korišćenje jednog veb servera od strane više DLT čvorova je prost način da se olakša upotreba sistema i smanji cena održavanja sistema. Međutim, ovo nije jedina optimizacija koja bi se na arhitekturalnom nivou mogla izvršiti. Tipično, svaki učesnik u P2P mreži ovog tipa imao bi svoj čvor, tj. računar (stvarni ili virtuelni) pod svojom kontrolom, koji implementira DLT protokole i osigurava da nijedna promena stanja koja se tiče datog člana ne bude upisana u distribuiranu glavnu knjigu ako je u suprotnosti s dogovorenim pravilima. Predložena arhitektura pretpostavlja da svaki učesnik održava po jedan takav čvor. Ovo, međutim, nije praktično u stvarnom svetu. Dok MNT i velike kompanije mogu održavati svoje čvorove i veb servere, individualni prozjumeri već posluju s malim profitnim marginama. Višak energije koji proizvedu predstavlja najčešće povremenu zaradu, a ne stalan prihod, dok su troškovi održavanja sopstvenog čvora nezanemarivi [118]. Uz to, održavanje čvora nije trivijalan zadatak i sukobljava se sa jednim od ciljeva istraživanja: da rešenje bude jednostavno za upotrebu i ne zahteva tehničku stručnost krajnjeg korisnika.

Da bi se izbegli opisani problemi, arhitektura može podržavati i agregatorske čvorove. Ovi čvorovi su paralelno korišćeni od odabranog podskupa učesnika. U suštini, oni služe kao lični čvor za više korisnika i predstavljaju njihove interese u distribuiranom sistemu. To čine tako što u poverenju drže ključ izveden iz privatnog ključa korisnika kao što su prozjumeri i mali proizvođači. Ključ predstavlja jedinstveni kriptografski otisak koji korisnik čuva radi svoje identifikacije i dokaza vlasništva nad resursima. Transakcije potpisane ovim ključem smatraju se potpisanim od strane prozjumera ili malog proizvođača, dajući agregatorskom čvoru „punomoć“ da obavlja takve radnje. Međutim, prozjumer zadržava kontrolu jer može prekinuti odnos s

agregatorskim čvorom u bilo kojem trenutku jednom transakcijom, čime opoziva mogućnost izvedenog ključa da verifikuje transakcije u ime prozjumera. Ovo sprečava da agregatorski čvor koji je delovao zlonamerno ili na bilo koji način izgubio poverenje krajnjeg korisnika nanosi dalju štetu.

Da bi agregatorski čvorovi bili responzivni prema željama korisnika, protokol može biti takav da agregatorski čvorovi moraju, na zahtev, predati sve podatke koje poseduju o datom učesniku u unapred dogovorenom formatu. Agregatorski čvorovi mogu funkcionisati kao poslovni subjekti koji za svoje usluge naplaćuju malu proviziju. Oni nude pristup DLT mreži na isti način na koji internet provajderi nude pristup internetu. Dva pomenuta tehnička rešenja (lako opozivanje ključeva i laka mobilnost podataka) znače da je prelazak s jednog agregatora na drugi trivijalan, i omogućavaju tržišnim mehanizmima da brzo uklone nestabilne ili maliciozne agregatore.

4.4 DLT podsistem

Glavna svrha DLT podsistema je skladištenje osetljivih podataka i obezbeđivanje mehanizama po kojima se ti podaci ne mogu izmeniti bez da promena bude trajno zabeležena. Dodatno, DLT podsistem omogućava više nezavisnih strana da potvrde da je promena nad podacima izvršena u skladu s unapred dogovorenim pravilima. Postoji nekoliko tehnologija koje bi se mogle koristiti za implementaciju sistema sa opisanim karakteristikama. Predložena arhitektura savetuje upotrebu R3 Korde, privatne DLT tehnologije sa kontrolom pristupa i polu-otvorenom strukturom. U narednim pasusima će ukratko biti objašnjeno zašto je napravljen ovaj izbor.

Blokčejn tehnologije koje se najčešće pominju u literaturi, kao što su Bitkoin [31] i Itirijum [30], su javni sistemi. To znači da bilo ko može kreirati svoj čvor i sve dok prati pravila opisana protokolom, on je ravnopravni član blokčejn mreže. Ovo omogućava maksimalnu skalabilnost i decentralizaciju, ali je veoma loše prilagođeno pravnom okviru u kojem bi softverski sistem za podršku trgovanju električnom energijom morao da funkcioniše. Primarni problem je u tome što su korisnici javnih blokčejn sistema anonimni (nije očigledno ko kontroliše čvorove u distribuiranoj mreži) i što svaki čvor u mreži skladišti sve podatke. Da bi softverski sistem za podršku trgovanju energijom adekvatno funkcionisao, identiteti korisnika unutar sistema moraju biti poznati i specifična oprema za prenos i proizvodnju električne energije mora biti lako povezana sa korisnicima u mreži.

Dakle, da bi ispunili zahteve pomenute u prethodnom pasusu neophodno je koristiti privatnu distribuiranu glavnu knjigu. Opisana arhitektura predlaže da bi se najbolji rezultati postigli poluotvorenim dizajnom sistema u kojem bi svako ko ispunjava određene uslove mogao da upravlja čvorom i pridruži se mreži. Dodatno, iz dosadašnjeg opisa arhitekture očigledno je da su odnosi između različitih učesnika mreže asimetrični, s različitim ulogama dodeljenim različitim učesnicima. Stoga ne možemo koristiti

DLT bez prava pristupa (engl. permissionless) kao osnovu opisane arhitekture, jer takvi DLT sistemi dodeljuju istu ulogu i ista prava svim učesnicima. Iz tog razloga, potrebno je koristiti privatnu distribuiranu glavnu knjigu (engl. private permissioned distributed ledger) u kojoj se različitim učesnicima dodeljuju različite uloge, dozvole, ovlašćenja i prava.

Postoji više implementacija ovakvih DLT sistema [33, 37, 119]. Motivacija za izbor R3 Korde u predloženoj arhitekturi je kreiranje optimizovane distribuirane glavne knjige koja se lako usklađuje sa industrijskim standardima i može skladištiti podatke samo u čvorovima koji su bili članovi transakcije. U takvom okruženju, Korda se pokazala kao superiorno rešenje u poređenju sa Hajperledžer Fabrikom [120, 121], koji se koristi kao osnova za mnoge slične sisteme za trgovinu energijom zasnovane na privatnoj DLT tehnologiji [54].

Sigurno i bezbedno skladištenje podataka predstavlja osnovnu funkcionalnost tehnologije poput Korde koja koristi distribuiranu glavnu knjigu. Svaki čvor u mreži ima sopstvenu bazu podataka (engl. vault) u kojoj skladišti stanja (engl. state) sadržana u transakcijama u kojima je učestvovao. Stanje predstavlja jedan od načina za skladištenje podataka. Ono je informacija o sistemu koje može biti označeno kao "potrošeno" ili kao spremno za upotrebu. To znači da stanje može biti aktuelno (može se koristiti u novim transakcijama) ili je na neki način izmenjeno (potrošeno) i ne može se više koristiti u novim transakcijama. Potrošena stanja predstavljaju istorijski prikaz promene stanja kroz vreme i ne mogu se brisati iz baze podataka čvora. Potrošena stanja su takođe međusobno kriptografski povezana. Dakle, bilo koja promena istorijskog stanja će narušiti lanac povezanih stanja i odmah indikovati da je došlo do promene podataka.

Predložena arhitektura koristi dva stanja za skladištenje podataka:

- Energetsko obećanje - ovo stanje sadrži informacije vezane za isporuku električne energije kao što su:
  - količina energije u kW,
  - vremensko trajanje isporuke,
  - datum isporuke,
  - vreme isporuke,
  - isporučioca obećanja (učesnik koji se obavezuje da će proizvesti energiju),
  - vlasnika obećanja (učesnik koji je aukcijskom kupovinom postao vlasnik obećanja),
  - informacija o tome da li je energija uspešno isporučena (informacija koju upisuje MNT nakon isteka momenta isporuke energije),
  - izvor energije,
  - zastavicu koja govori da li je energija proizvedena korišćenjem obnovljivih izvora.

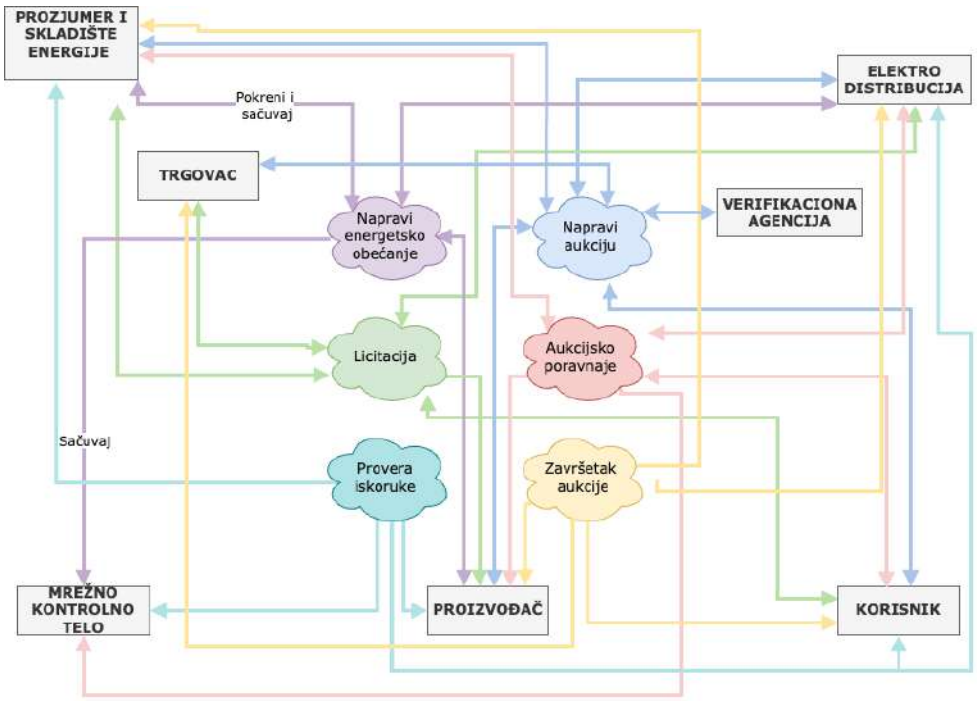
- Aukcija energetskog obećanja - ovo stanje čuva sve informacije relevantne za prodaju energetskih obećanja kao što su:
  - početna cena,
  - trenutna najviša ponuđena cena,
  - korisnik koji je ponudio trenutnu najveću cenu,
  - vreme završetka licitacije,
  - pobednik licitacije,
  - aukcionar (učesnik koji je napravio aukciju).

Prozjumeri ili prodavci električne energije prave energetska obećanja. Nakon toga oni takođe prave aukcije na kojima se obećanja prodaju. Drugi prozjumeri, proizvođači, korisnici ili trgovci se mogu takmičiti za kupovinu energetskog obećanja. Kako vreme isporuke električne energije naznačene na obećanju ne mora biti jednako vremenu isteka aukcije, pobednik aukcije koji je sada novi vlasnik energetskog obećanja može ponovo da pravi nove aukcije i dalje prodaje energetsko obećanje sve do momenta ispunjenja obećanja tj. isporuke električne energije. Na ovaj način se pravi sekundarno tržište za trgovinu obećanjima u kojem mogu učestvovati i trgovci koji nisu u stanju da zapravo potroše obećanu energiju i čiji je cilj da obećanje prodaju potrošaču pre momenta isteka obećanja.

U predlogu sistema za podršku trgovanja energijom, pametni ugovori osiguravaju da količina energije definisana u energetskim obećanjima nije premala i beznačajna, niti prevelika i nerealna. Pametni ugovori takođe osiguravaju pravilno rukovanje aukcijama tako što obezbeđuju da: samo vlasnik može kreirati aukciju, samo najviši ponuđač može postati novi vlasnik aukcije i da novac bude poslat prodavcu aukcije nakon prenosa vlasništva.

Komunikacija između čvorova u Kordi implementirana je putem tokova (videti Sliku 4.2). Oni se mogu zamisliti kao redosled stvari koje svaki od čvorova treba da izvrši pre nego što transakcija postane potpuna. Korisnik koji pokreće tok kreira transakciju, i tok se neće završiti sve do momenta dok svaki član toka ne izvrši svoj zadatak koji je deo toka i unapred je određen dizajnom sistema. Tokovima se pojednostavljuje proces pravljenja interakcije između članova mreže i svodi se na jednostavno navođenje osnovnih delova transakcije: stanja, ugovora koji upravljaju stanjima i notara.

Notari su specijalizovani učesnici mreže koje je uvela Korda. Njihova svrha je da verifikuju transakcije, prate životni ciklus stanja, sprečavaju dvostruku potrošnju i generalno sprečavaju nedozvoljene akcije koje nisu deo protokola. Učesnik koji inicira tok takođe određuje i ko su učesnici transakcije (notar je obavezni član svake transakcije). Prilikom građenja transakcije moguće je definisati dve grupe učesnika. Prva grupa su učesnici koji su samo posmatrači (engl. observer parties). Oni prate validaciju transakcija i čuvaju je u svojim bazama podataka. Druga grupa su učesnici



Slika 4.2: Korda tokovi u predloženoj arhitekturi [122]

čiji digitalni potpis je neophodan da bi se transakcija uspešno izvršila. Oni su mnogo bitniji od posmatrača i obično ih čine članovi koji direktno učestvuju u transakciji i čija potvrda je neophodna da bi se transakcija izvršila. Svi mehanizmi za potpisivanje i propagiranje transakcija integrisani su u Korda tehnologiju kroz unapred razvijene pod-tokove (engl. sub flows). Oni omogućavaju programerima da rukovode složenim pozivima udaljenih (engl. Remote Procedure Call - RPC) operacija između više distribuiranih čvorova bez većih poteškoća.

Tokovi koji bi bili deo predloženog DLT podsistema prikazani su na Slici 4.2 i njihova definicija je opisana u narednim podsekcijama.

4.4.1 Pravljenje energetskog obećanja

Ovaj tok predstavlja početak celog procesa trgovine energijom. Kada proizvođači ili prozjumeri očekuju višak u proizvodnji električne energije, pokreću ovaj tok. Time kreiraju obećanje da će određena količina električne energije biti isporučena u elektroenergetsku mrežu u određeno vreme. Obećanjem se kasnije trguje unutar mreže. Učesnici koji poseduju EO u trenutku isporuke imaju pravo da potroše

obećanu količinu energije. Rezultat ovog toka je transakcija koja sadrži početno stanje energetskog obećanja. Učesnici transakcije su čvor koji kreira EO i mrežno nadzorno telo. MNT prati elektroenergetsku mrežu i osigurava da se obećanje ispuni u trenutku isporuke. Samo proizvođači, prozjumeri i elektroenergetske kompanije smeju inicirati tok za kreiranje energetskog obećanja jer samo oni mogu distribuirati energiju. Pseudokod opisanog toka dat je u Dodatku B kao Algoritam 1. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Ukoliko čvor koji je pokrenuo tok nije prozjumer, proizvođač ili elektroprivreda, vrati izuzetak (engl. exception).
3. Pravljenje transakcije.
4. Proverava se da li član koji je pokrenuo tok ima dovoljno sredstava na računu.
5. U odnosu na ishod prethodnog koraka:
   - Ako član ima dovoljno sredstava, ona se prebacuju kao depozit mrežnom kontrolnom telu.
   - Ako član nema dovoljno sredstava, tada dolazi do izuzetka.
6. Verifikaciona agencija proverava tvrdnje o izvoru električne energije i potvrđuje ili opovrgava ih
7. Pravi se stanje energetskom obećanja i postavlja kao deo transakcije
8. Transakcija se potpisuje od strane člana koji je pokrenuo tok, verifikacione agencije i mrežnog nadzornog tela.
9. Transakcija se čuva u bazi podataka.

Ovaj tok osigurava tačno praćenje kreiranja i izvršenja energetskih obećanja u skladu s pravilima sistema, omogućavajući sigurno trgovanje i zaštitu svih učesnika.

4.4.2 Pravljenje aukcije

Predstavlja prvi tok u procesu trgovine energetskim obećanjima. Da bi se ovaj tok inicirao, učesnik mora biti vlasnik energetskog obećanja koje nije isteklo. Energetsko obećanje ističe nakon što prođe vreme isporuke energije. Iniciranjem ovog toka, EO se stavlja na aukciju. Vlasnik mora navesti početnu cenu obećanja i rok završetka aukcije. Rezultat ovog toka je stanje „aukcije“ koje će koristiti tokovi u daljem procesu trgovanja kao što su: tok za licitaciju, tok za poravnanje aukcije i tok za završetak aukcije.

Inicijatori toka mogu biti svi vlasnici energetskog obećanja. Ovo isključuje samo MNT i verifikacionu agenciju iz liste svih učesnika u mreži. Takođe, svi učesnici u mreži osim mrežnog kontrolnog tela učestvuju u transakciji, ali njihov potpis nije potreban za validaciju. Oni su samo posmatrači (engl. observers), što znači da čuvaju transakcije u svojoj bazi podataka i bivaju obavešteni o bilo kojoj promeni stanja aukcije. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Kreiranje stanja aukcije koje sadrži detalje o energetskom obećanju koje je na prodaju, uključujući početnu cenu i rok trajanja aukcije.
3. Potpisivanje transakcije od strane inicijatora osigurava da ostali posmatrači mogu potvrditi da je aukcija koji se nudi i koristi za prodaju EO zaista potpisan od strane vlasnika EO.
4. Slanje transakcije posmatračima koji čuvaju stanje aukcije u bazi podataka.
5. Čuvanje stanja aukcije u bazi podataka inicijatora osigurava da i inicijator ima evidenciju o aukciji koju je pokrenuo.

Ovaj tok omogućava vlasnicima EO da na transparentan i distribuiran način prodaju svoja energetska obećanja kroz aukciju. Posmatrači sa jedne strane osiguravaju integritet aukcije, dok sa druge strane prate sve promene stanja aukcije i potencijalno licitiraju.

4.4.3 Licitacija

Predstavlja tok koji se može koristiti nakon što je aukcija kreirana i označena kao aktivna. Inicijator ovog toka želi da ponudi novu cenu za EO kako bi postao ponuđač s najvišom ponudom. Cene koje inicijator nudi moraju biti više od početne cene (u slučaju prve ponude) ili viša od trenutne najbolje cene (u slučaju da je neko u prošlosti već izvršio licitaciju). Ako se ponudi viša cena, inicijator postaje novi učesnik s najvišom ponudom i stiče priliku da postane novi vlasnik EO nakon isteka roka aukcije.

Inicijator toka može biti bilo koji član osim mrežnog autoriteta, verifikacione agencije i inicijatora aukcije. Učesnici koji nisu inicijator ili MNT mogu služiti kao posmatrači transakcije. Oni time potvrđuju da su pravila poštovana i skladište izmenjeno stanje aukcije u svojoj bazi podataka. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Proverava se da li je nova ponuda viša od prethodne najviše ponude. Ako nije, transakcija se odbija, a stanja se ne menjaju.
3. Aukcija se ažurira kroz izmenu novog ponuđača s najvišom ponudom.
4. Modifikovano stanje aukcije uključuje se u novu transakciju.
5. Transakcija se potpisuje i šalje svim ostalim posmatračima kako bi je sačuvali u svojim bazama podataka.

Ovaj tok omogućava: fer i transparentno licitiranje u sistemu, čuvanje integriteta aukcije i obezbeđivanje pravilnog praćenja ponuda i promena u stanju aukcije.

4.4.4 Poravnanje aukcije

Predstavlja završni tok u procesu trgovine energijom. Nakon što rok za aukciju istekne, ponuđač s najvišom ponudom može pokrenuti tok za poravnanje aukcije. Ovaj tok uklanja sredstva s računa inicijatora i šalje ih trenutnom vlasniku EO. Takođe, modifikuje stanje EO tako da inicijator toka postaje novi vlasnik.

Učesnici transakcije su inicijator (ili član identifikovan kao ponuđač s najvišom ponudom), trenutni vlasnik EO i MNT. Mrežno nadzorno telo kontroliše isporuku energije u fizičkoj mreži, te mora biti obavešteno o promeni vlasništva EO. Stari vlasnik EO mora potpisati transakciju kako bi svi učesnici mreže prihvatili prenos vlasništva. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Novi vlasnik EO prebacuje sredstva starom vlasniku EO.
3. EO se ažurira tako da inicijator postaje novi vlasnik.
4. Kreira se transakcija u koju se ubacuje modifikovano EO stanje.
5. Transakcija se potpisuje od strane inicijatora i šalje se MNT i prethodnom vlasniku na potpisivanje i validaciju.
6. Ako se obezbede kontrapotpisi, inicijator ih prikuplja i finalizuje transakciju.
7. Svi učesnici čuvaju ažurirano stanje EO u svojim bazama podataka.

Ovaj tok obezbeđuje transparentan i fer prenos vlasništva nad EO, uz praćenje svih relevantnih informacija i poštovanje pravila sistema.

4.4.5 Završetak aukcije

Predstavlja zakazani tok koji modifikuje stanje aukcije neaktivnim i sprečava dalje licitiranje. Kada rok aukcije istekne, tok za završetak aukcije automatski pokreće vlasnik aukcije. Logika toka je jednostavna, ona samo prebacuje status aukcije iz aktivnog u neaktivno. Svi učesnici mreže koji su posmatrači aukcije bivaju obavešteni o završetku aukcije primanjem transakcije s izmenjenim stanjem aukcije koje zatim čuvaju u svojim bazama podataka. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Status aukcije se menja iz aktivnog u neaktivan.
3. Izmenjena transakcija se potpisuje.
4. Potpisana transakcija se šalje svim posmatračima kako bi ažurirali svoje baze podataka.

Ovaj tok osigurava transparentno i pravovremeno zatvaranje aukcije, čime se obezbeđuje da licitacija nije moguća nakon isteka roka.

4.4.6 Provera isporuke

Predstavlja završni tok u celom procesu isporuke energije i njegovo pokretanje je unapred zakazano. Ovaj tok je zakazan da se automatski inicira na čvoru mrežnog

kontrolnog tela nakon isteka vremena isporuke. Ovaj tok je ključan jer njegova uloga spaja stvarnu elektroenergetsku mrežu sa softverskim sistemom koji se koristi za podršku trgovanju energijom. Da bi ovaj tok radio pravilno, sistem se oslanja na senzore koji prate svu proizvodnju i potrošnju energije od strane svih korisnika u mreži. Na taj način MNT lako može da utvrdi da li je jedna strana proizvela određenu količinu energije, i da li je druga strana tu energiju potrošila. Stoga, ako se utvrdi da je obećanje ispunjeno, depozit koji je umanjen za naknadu održavanja mreže se vraća proizvođaču. Ako obećanje nije ispunjeno, deficit u proizvodnji energije pokriva krajnji snabdevač (elektroprivreda), kojem se isplaćuje puna suma depozita (umanjena za naknadu održavanja mreže). Tok provere isporuke osigurava povezivanje digitalnog sistema sa fizičkim svetom i omogućava automatsko upravljanje transakcijama na osnovu stvarnih podataka o proizvodnji i potrošnji energije. Time se obezbeđuje pouzdanost i transparentnost u celom procesu isporuke energije. Logika ovog toka funkcioniše na sledeći način:

1. Izbor notara.
2. Određivanje da li je EO ispunjen ili nije. Ovaj podatak MNT dobija od kontrolnog sata koji je povezan sa čvorom koji je napravio EO. U slučaju je u obećanom periodu dogovorena količina energije isporučena, EO se označava kao ispunjeno, u suprotnom se označava kao neispunjeno.
3. U zavisnosti od ishoda drugog koraka:
   - Ako je obećanje ispunjeno, depozit se vraća dobavljaču.
   - Ako obećanje nije ispunjeno, vrednost depozita se uplaćuje elektroenergetskoj kompaniji koja isporučuje energiju umesto dobavljača.
4. Prema ishodu trećeg koraka, EO se označava kao ispunjeno ili neispunjeno.
5. Transakcija se šalje na potpisivanje dobavljaču (ako je obećanje ispunjen) ili elektroprivredi (ako obećanje nije ispunjen).
6. Prijem potpisane transakcije od suprotne strane:
   - Ako je transakcija validna ona se čuva u bazi podataka čvorova.
   - Ako transakcija nije validna, tok generiše izuzetak. U tom slučaju, transakcija se odbacuje, podaci se ne čuvaju u bazi podataka, a učesnici se obaveštavaju o problemu.

4.5 Diskusija

Predložena arhitektura sadrži opise članova, njihovih međusobnih veza i funkcionalnosti neophodnih za rad softverskog sistema koji se koristi kao podrška trgovanju energijom baziranom na DLT tehnologiji. Struktura energetskih obećanja i aukcija se dobro uklapa u DLT okvir, i sve ukazuje na to da se mogu adekvatno koristiti u svrhu trgovanja energijom. Međutim, ovako osmišljen sistem nosi određene rizike o kojima će se diskutovati u ovoj sekciji. Takođe, diskutovaće se i o dodatnim funkcionalnos-

tima i izmenama sistema koje bi se mogle dodatno poboljšati i povećati njegovu upotrebljivost.

4.5.1 Glavni rizici

Arhitektura sistema je dizajnirana tako da isključuje većinu problema koji bi mogli ometati širu upotrebu opisanog decentralizovanog sistema za trgovinu energijom. Međutim, predloženi dizajn nije bez nedostataka i rizika od kojih se ističu: rizik od brze transformacije mreže, jedinstvena tačka otkaza sistema (engl. single point of failure), veliki broj posmatrača u transakcijama i ekonomske barijere.

Brza transformacija mreže

Arhitektura je dizajnirana da funkcioniše uz upotrebu postojeće elektroenergetske infrastrukture. To znači da bi iskorišćavanje specijalnih mogućnosti koje bi takva nova okruženja pružala zahtevalo dodatne izmene i modifikacije predložene arhitekture. U tom scenariju bi konkurentni sistemi koji koriste novine u mrežnoj infrastrukturi imali prednost u odnosu na predloženo rešenje koje je osmišljeno da funkcioniše bez ikakvih specifičnih promena na mreži koje bi podržavale P2P trgovanje.

Vrlo je verovatno da pomenute transformacije mreže ne bi ometale rad predloženog sistema, međutim, moguće je da bi učinile njegovu upotrebu ekonomski neefikasnom. Ovo ograničenje jeste realno, međutim, ono nije isključivo povezano sa predlogom arhitekture date u ovoj disertaciji, već je generalni problem svakog sistema koji bi se bavio sličnom temom. Razumna je i pretpostavka da bi se izmene na mreži razvijale postepeno, pa bi prateći njih i pomenuta arhitektura mogla evoluirati i prilagoditi se novim uslovima kroz maksimalno iskorišćenje novih funkcionalnosti.

Jedinstvena tačka otkaza

Iz dosadašnjeg opisa arhitekture evidentno je da se njeno neometano funkcionisanje oslanja na nekoliko mehanizama koji su povezani s fizičkom elektroenergetskom mrežom. Naravno, činjenica da softverski sistem za podršku trgovanju energijom zavisi od elektroenergetske mreže nije iznenađujuća s obzirom da se opisana arhitektura oslanja na elektroenergetski sistem kao izvor informacija o proizvodnji i potrošnji energije. Ove informacije su ključne i vremenski osetljive. Stoga, bez preciznog i pravovremenog rada senzora, sistem za podršku trgovanju neće pravilno funkcionisati.

Pomenuta mana sistema se može ublažiti kroz upotrebu vrlo pouzdane opreme za komunikaciju i upotrebom pouzdanih senzora. Međutim, čak i u tom slučaju sistem je dizajniran tako da postoji samo jedno mrežno nazorno telo i od njega zavisi pravilno funkcionisanje sistema. U slučaju da senzori prestanu pravilno da funkcionišu ili dođe do problema u softverskoj komponenti koja upravlja mrežnim nadzornim telom, pravilan rad celog sistema dolazi u pitanje. Jedino pravo rešenje problema jedinstvene tačke otkaza sistema je uključivanje više izvora istine koji obaveštavaju

softverski sistem o stanju u elektroenergetskoj mreži i upotreba nezavisnih senzora koji postavljaju podatke direktno na mrežu a ne isključivo mrežnom nadzornom telu. Pomenute izmene u arhitekturi sistema bi u mnogome zakomplikovale upravljanje sistemom, ali bi istovremeno i distribuirale poslednju centralizovanu tačku u arhitekturi. To bi omogućilo sistemu da funkcioniše (u smanjenom kapacitetu) čak i u slučajevima delimičnog kvara na delu sistema koji prikuplja informacije sa elektroenergetske mreže.

Odluka da arhitektura sadrži jedno centralno telo koje vodi računa o stanju na mreži je donesena sa ciljem da sistem bude što primenjiviji uz upotrebu trenutne infrastrukture. Elektroenergetske mreže su mahom dizajnirane tako da se centralizovani sistemi koriste za praćenje stanja mreže. Njima se najčešće upravlja iz jedne (ili malog broja) tačke koja prikuplja sve podatke o stanju mreže, stoga je vrlo jednostavno prikupiti sve podatke upotrebom čvora nadzornog mrežnog tela koji predstavlja apstrakciju i proširenje nad već postojećim funkcionalnostima elektroenergetske mreže.

Veliki broj posmatrača u transakcijama

Jedan od glavnih rizika prilikom skaliranja mreže je povećanje broja posmatrača u transakcijama koje prave aukcije i vrše licitacije. Posmatrači su neutralni učesnici u transakcijama koji potvrđuju njenu validnost i nikako aktivno ne doprinose transakciji. Međutim, ukoliko je broj posmatrača prevelik, broj učesnika u transakciji se povećava, što povećava latenciju izvršavanja transakcija i konsekventno usporava ceo DLT podsistem. Korda je izabrana kao predložena tehnologija za implementaciju sistema baš zato što omogućava potpunu kontrolu nad tim koji učesnici su članovi transakcija. Uz predloženu arhitekturu moguće je koristiti nekoliko tehnika koje bi se mogle primeniti kako bi se smanjio broj posmatrača u transakcijama. Prva tehnika koja je izuzetno efikasna i laka za implementaciju jeste praćenje zainteresovanosti korisnika za kupovinu električne energije u datom trenutku. Na ovaj način se korisnički čvorovi uključuju u transakcije koje prate aktivne aukcije samo u slučajevima kada su korisnici zainteresovani za kupovinu energije. Ovim se u velikoj meri smanjuje broj korisnika koji učestvuju u transakcijama. U mrežama koje imaju više stotina ili hiljada čvorova, ova tehnika bi u velikoj meri poboljšala performanse mreže. Druga tehnika je ograničavanje čvorova koji učestvuju u transakciji licitacije samo na čvorove korisnika koji su već prethodno vršili licitaciju za datu aukciju. Ovim bi se novi korisnici priključili kao posmatrači transakcija za licitaciju tek u trenutku kada prvi put licitiraju. Novi korisnici koji bi želeli da kupe EO bi svakako mogli da vide najveću ponuđenu cenu aukcije prilikom pretrage aktivnih aukcija. Ova tehnika bi u maloj meri smanjila transparentnost u sistemu, ali bi, s druge strane, povećala performanse sistema i smanjila opterećenje korisničkih čvorova koji svakako nisu zainteresovani za kupovinu licitiranih energetskih obećanja. Očekuje se da će prethodne dve tehnike u velikim mrežama smanjiti broj posmatrača u ključnim transakcijama, poput aukcija i

licitacija, i do 90%. Treća tehnika se može koristiti samo u izuzetno velikim mrežama koje se prostiru nad više geografskih područja i bazira se na lokalizaciji transakcija. Samo korisnici koji se nalaze u istom geografskom području učestvuju kao posmatrači u transakcijama aukcija i licitacija.

Ekonomske barijere

Jedan od velikih distinkcija između predloženog sistema i drugih sistema za trgovanje energijom pomenutih u poglavlju 3, je to što ne koristi tokene za predstavljanje energije kojom se trguje niti izlistava EO na javnim blokčejn i DLT mrežama. Ovo neminovno dovodi do slabije likvidnosti na tržištu. Veliki broj ljudi već trguje raznim tokenima, i oni bi mogli predstavljati prirodno tržište i za tokene koji su povezani sa energetskim obećanjima. Nasuprot tome, zatvoreni sistemi za trgovinu (kao što je predloženi sistem) će inicijalno imati tržište koje može stagnirati sve dok se ne dostigne kritična masa korisnika koja trguje unutar sistema [123].

Mana postojanja tokena za trgovinu EO je nestabilnost tržišta kriptovaluta (engl. cryptocurrency) i njihova spekulativna priroda. Uvođenjem velike količine spekulacija u trgovinu EO može dovesti do disasocijacije tokena od fizičke električne energije koju treba isporučiti i proizvesti na kraju trgovanja. Neodgovorno trgovanje bi moglo destabilizovati elektroenergetsku mrežu koja prvenstveno mora osigurati da se proizvedena električna energija troši u realnom vremenu. Stoga bi uvođenje tokena kojim bi se moglo slobodno i masovno trgovati bez razumevanja fizičkog sistema koji se iza njega nalazi, predstavljalo kontradikciju u odnosu na primarni cilj savesne trgovine EO. Nesavesna i prekomerna kupovina EO bez razumevanja da obećanje predstavlja fizičku energiju koju nakon isteka obećanja treba potrošiti, može dovesti do destabilizacije mreže.

Dodatna mana tokenizacije sistema je kratkoročna vrednost tokena. Ukoliko bi primarni cilj tokenizacije sistema bio povećanje likvidnosti tržišta uključivanjem velike količine korisnika koji trguju drugim tokenima, onda je bitno naglasiti koliko bi token koji predstavlja elektronsko obećanje bio drugačiji od tradicionalnih ERC-20 i ERC-721 tokena (kojima se najčešće trguje na Itirijum mreži). Glavna razlika bi bila u prolaznoj prirodi važenja EO tokena. Za razliku od popularnih tokena koji se nakon kupovine nalaze u vlasništvu kupca i postoji potencijal za porast njihove vrednosti, EO token poseduje kratak period u kome se njime može trgovati. Pri isteku važenja tokena je ključno da on postane vlasništvo korisnika koji zapravo ima potrebu za električnom energijom i može da je potroši u datom trenutku. Štaviše, ukoliko se EO token "ne potroši" korisnik koji je vlasnik tokena bi morao biti sankcionisan pošto nije ispunio obećanje tako što je potrošio električnu energiju. Ovo bi uvelo velike poteškoće za većinu korisnika koji rutinski trguju velikim količinama tokena radi sticanja profita. Odnos prema EO tokenu bi morao biti drugačiji od odnosa

prema drugim tokenima što bi potencijalno obeshrabrilo veliku količinu trgovaca da uopšte ulaze u trgovinu sa EO tokenom.

Rizik ekonomske barijere se može otkloniti dovoljno brzim uključivanjem korisnika u sistem za podršku trgovanju energijom. Primarni način uključivanja korisnika bi mogla biti institucionalna podrška od strane već postojećeg sistema za naplatu električne energije. Alternativni pristup može biti kreiranje tokena povezanog sa elektronskim obećanjem, međutim svi pomenuti problemi koje bi to uveli ukazuju na to da tokenizacija nije idealno rešenje. Potencijalna popularizacija sekundarnog tržišta trgovanja EO kroz upotrebu tokena koji ne bi bio direktno vezan za EO, bi bilo potencijalno kompromisno rešenje. Tokenomija takvog tokena zahtevala bi dodatna istraživanja i nije predmet ove teze, ali bi mogla omogućiti stvaranje popularnijeg sekundarnog tržišta.

4.6 Dodatne funkcionalnosti

Opis arhitekture sistema je obuhvatio osnovne članove, njihove međusobne veze i glavne funkcionalnosti sistema. Međutim, lako ga je proširiti dodatnim funkcionalnostima ili infrastrukturnim nadogradnjama koje bi ga učinile pogodnijim za svakodnevnu upotrebu. Predložene dodatne izmene sistema uključuju: rasparčavanje EO, automatizaciju trgovine i alternativne metode trgovine.

4.6.1 Rasparčavanje i spajanje energetskih obećanja

Trenutno se energetskim obećanjima trguje u celosti: član mreže obeća isporuku određene količine kWh i tim obećanjem se trguje kao celinom. Međutim, bilo bi u potpunosti moguće omogućiti da se svako EO koje nije isteklo razdeli na više manjih EO, pri čemu bi suma obećane energije u novim EO tačno odgovarala obećanoj proizvodnji iz originalnog EO. Isto tako, moguće je implementirati mehanizam kojim se više obećanja može spojiti u jedno veće EO. Ova fungabilnost energije (engl. fungibility) bi pojednostavila složenije trgovinske operacije iz perspektive korisnika i omogućila implementaciju sistema u kojem prozjumeri i proizvođači mogu lakše da nadomeste tehničke kvarove i izbegnu plaćanje kaznenih naknada za neispunjenu isporuku. Ako postoji funkcionalnost objedinjavanja više EO, onda je moguće implementirati i zamenu određene količine energije u jednom EO sa dodavanjem novog EO čiji je vlasnik drugi korisnik. Time je moguće pravovremeno zameniti obećanje za koje se predviđa da više neće biti ispunjeno kupovinom novih obećanja od drugih korisnika. Drugim rečima, prozjumer koji je obećao određenu količinu energije tokom određenog vremena, ali mora da odustane od tog obećanja zbog tehničkih problema, može umesto neuspešne isporuke i plaćanja kazne, da kupi dovoljno energetskih obećanja koja koristi za pokrivanje svog obećanja.

Ova funkcionalnost bi ojačala sekundarno tržište i, ukoliko ono bude zdravo, mogla

bi značajno smanjiti teret na elektroprivredi koja se koristi kao krajnji snabdevač energije koji stabilizuje mrežu kada energetska obećanja ne budu ispunjena. Mana ovog pristupa je značajna komplikacija logike za prodaju energije iz perspektive prozjumera i proizvođača. Međutim, automatizacija trgovanja koja je nova funkcionalnost objašnjena u narednoj podsekciji bi u velikoj meri sakrila pomenutu složenost logike za trgovanje od krajnjih korisnika.

4.6.2 Automatizacija trgovine

Do sada su opisani osnovni elementi neophodni za pravilno funkcionisanje sistema. Međutim, očekuje se da će kompletna komercijalna verzija rešenja uključivati dalju automatizaciju trgovine zasnovanu na primeni veštačke inteligencije i mašinskog učenja. Na primer, automatizovani agent za trgovinu koji upravlja čvorom prozjumera može se osloniti na trenutnu proizvodnju, istoriju proizvodnje, raspoloživu površinu solarnih panela i vremensku prognozu za sutrašnji dan i formirati energetsko obećanje za određeni vremenski interval. Opisani koraci se izvršavaju na lokalnom čvoru prozjumera koji prodaje energiju na lokalnom tržištu.

Razvijanje posebnih strategija za trgovinu energijom je proces koji elektrodistribucija i veći proizvođači mogu sebi da priušte. Međutim, mali proizvođači i prozjumeri koji prodaju višak proizvedene energije najčešće neće imati inicijativu da ulože veliku količinu vremena na razvoj algoritama za trgovinu. Stoga je neophodno da sistem ponudi gotove automatizovane agente koji mogu da izvršavaju kupovinu i prodaju energije za svakog člana mreže. Tako korisnici mogu da izaberu unapred postojeće agente koji predstavljaju osmišljenu i unapred definisanu strategiju trgovanja. Agente je moguće podešavati po svojim željama i marginalno im izmeniti ponašanje. Očekuje se da će u većini slučajeva prozjumeri koristiti čvorove agregatora. Stoga je očekivano od provajdera da optimizuje svoje algoritme za trgovinu i tako trud očekivan od krajnjeg korisnika svede na minimum.

4.6.3 Alternativne metode trgovine

Podrazumevani metod trgovine opisan u predlogu sistema je jednostavna aukcija. Međutim, moguće je dodavati nove učesnike u mreži koji predstavljaju tržišta (engl. marketplace) sa alternativnim metodama trgovine. Tržište može implementirati druge pristupe trgovini kao što je, na primer, transakcioni bazen (engl. transaction pool) sa automatizovanim i periodičnim poravnanjem.

Funkcije tržišta:

- Implementacija i pružanje novih tehnika trgovine.
- Obezbeđivanje infrastrukture potrebne za korišćenje tih tehnika.
- Naplaćivanje transakcione naknade, uz već postojeće naknade koje mreža naplaćuje za pružene usluge.

Na ovaj način, tržište može: proširiti funkcionalnosti sistema, omogućiti napredne oblike trgovine i stvoriti dodatne izvore prihoda.

4.7 Implementacija prototipa sistema

U predhodnim sekcijama poglavlja je opisan predlog arhitekture koja se koristi za podršku trgovanju električnom energijom. Međutim, da bi se ispitala praktična primena arhitekture, neophodno je implementirati prototip sistema. Prototip se koristi za izvršavanje serije eksperimenata koji utvrđuju upotrebljivost i potrošnju resursa predložene arhitekture sistema.

Poželjno je da prototip sistema implementira što veći broj funkcionalnosti predložene arhitekture. Sa druge strane, opisana arhitektura predlaže kompleksan softverski sistem koji se sastoji od:

- većeg broj veb servera,
- korisničkog interfejsa za podršku trgovanju,
- DLT podsistema koji se sastoji od velikog broja čvorova povezanih u P2P mrežu,
- mehanizama za komunikaciju i skladištenje podataka između čvorova u DLT podsistemu,
- modula za povezivanje sa elektroenergetskom mrežom radi prikupljanja podataka o proizvodnji i potrošnji u realnom vremenu.

Kompletna implementacija opisanog sistema koji se sastoji od nabrojanih softverskih komponenti zahteva veliki napor. Po veoma grubim procenama, timu iskusnih programera, sastavljenom od petoro ljudi koji rade puno radno vreme, trebalo bi više od godinu dana da implementira ceo softverski sistem i učini ga upotrebljivim za krajnje korisnike [124]. Kako je implementacija prototipa sprovedena uz upotrebu ograničenih resursa, prototip uključuje samo ključne funkcionalnosti sistema i ne fokusira se na njegovu optimizaciju za komercijalnu upotrebu. Gledano sa visokog nivoa apstrakcije, kriterijum za uključivanje funkcionalnosti u prototip je bio: obuhvatanje što šireg skupa metoda za distribuirano trgovanje energijom, formiranje transakcija uz kolaboraciju članova mreže i redundantno skladištenje transakcija. Stoga su glavni principi pri implementaciji prototipa bili:

- uključivanje svih opisanih članova DLT podsistema u prototip,
- implementacija mehanizama za pravljenje i trgovanje energetskim obećanjima u DLT podsistemu,
- smanjenje broja veb servera korištenih za pristup DLT podsistemu,
- pravljenje jednostavnog korisničkog interfejsa.

Izvorni kod konkretne implementacije prototipa predloženog sistema dostupan je na GitHub repozitorijumu[1]. Prototip je implementiran upotrebom R3 Korda tehnologije

[1] https://github.com/NebojsaHorvat/PowerAuction

za implementaciju DLT podsistema. Programski jezik Java i Spring Boot frejmvork su upotrebljeni za implementaciju veb servera. Za implementaciju korisničkog interfejsa su upotrebljeni programski jezik JavaScript i frejmvork Angular. Na početnoj strani GitHub repozitorijuma se nalazi kratko uputstvo za pokretanje aplikacije u lokalnom okruženju i testiranje prototipa. Kako se prototip sastoji od DLT podsistema koji je neophodno pokrenuti pre testiranja aplikacije, bitno je naglasiti da je za ostvarivanje optimalnog iskustva korišćenja prototipa potrebno koristiti računar koji ima minimalno 16 GB radne memorije i bar četiri procesorska jezgra.

DLT podsistem se sastoji od:

- Članova - pojedinačnih čvorova u mreži koji imaju svoje uloge kao što su prozjumer, mrežno kontrolno telo, itd.
- Tokova - logike koja se koristi za formiranje transakcija između članova mreže i određuje koji članovi mrežu čuvaju transakcije u svojim lokalnim bazama podataka.
- Pametnih ugovora - određuju ograničenja koja moraju biti zadovoljena da bi transakcija bila uspešna.

Čvorovi u Korda mreži su predstavljeni kao posebni procesi bazirani na Java virtuelnoj mašini. To znači da je neophodno pokrenuti N posebnih procesa na računaru da bi se pokrenulo N čvorova mreže. Da bi pokrenuti procesi činili povezanu P2P mrežu, neophodno je konfigurisati svaki čvor tako da ima mogućnost da preko mrežne konekcije pristupi drugim čvorovima. Konfiguracija čvorova u lokalnom okruženju nije komplikovana, dok je u distribuiranom okruženju neophodno osigurati da svaki čvor ima svoju javnu IP adresu i port preko koga mu se može pristupiti.

Korda tokovi predstavljaju logiku kojom se formiraju transakcije u mreži. Jedan član mreže započinje tok formiranjem inicijalne transakcije, nakon čega se transakcija šalje drugim članovima mreže. Članovi koji dobiju transakciju su takođe učesnici u transakciji i proveravaju da li su svi uslovi transakcije ispunjeni. Ukoliko su svi članovi saglasni sa transakcijom, potpisuju je i vraćaju inicijatoru. Nakon što su svi potpisi prikupljeni, transakcija se upisuje u lokalnu bazu podataka svih učesnika. Komunikacija između učesnika transakcije je komunikacija između različitih čvorova u mreži koji se najčešće ne nalaze na istom računaru. Mrežna komunikacija i kriptografsko potpisivanje transakcija, koji su ključni aspekti tokova, nisu trivijalne stvari za implementaciju. Stoga Korda pruža unapred pripremljene funkcije koje obavljaju ove zahtevne poslove. To dovodi do toga da se tokovi svode na korišćenje unapred predefinisanih funkcionalnosti, pisanje logike za formiranje transakcije i formiranje uslova za proveru validnosti transakcije.

Mrežno nadzorno telo je deo DLT podsistema koji mora u realnom vremenu očitavati informacije o proizvodnji i potrošnji sa elektroenergetske mreže. Implementacija ovog čvora zahteva integraciju sa postojećim mrežnim operaterom. Kako u trenutnoj fazi

istraživanja nije ostvarena saradnja sa mrežnim operaterom, mrežno kontrolno telo u realnom vremenu simulira povezivanje na funkcionalnu elektroenergetsku mrežu. Glavno ograničenje pri simuliranju konekcije na mrežu se vidi pri očitavanju isporuke električne energije. Prototip simulira konekciju na stvarnu mrežu i probabilistički određuje da li je energija uspešno isporučena ili ne.

Tokom implementacije prototipa je doneta odluka o korišćenju jednog veb servera za pristup svim članovima mreže. Mana ovog izbora je centralizacija pristupa decentralizovanoj mreži. Dodatno, kontrola cele mreže upotrebom jednog veb servera je loša sa aspekta sigurnosti. Svi kredencijali i kripto materijali neophodni za pristup čvorovima u celoj mreži su na jednom mestu. U praksi bi ovakav pristup bio veoma opasan pošto bi maliciozni korisnici mogli u slučaju bezbednosnog propusta da upravljaju svim čvorovima u mreži (uključujući i MNT čime bi se obesmislilo postojanje celog sistema). Međutim, kako primarni cilj prototipa nije komercijalna upotreba, već demonstracija upotrebljivosti predložene arhitekture i merenje performansi sistema, upotreba jednog servera nije problematična. DLT podsistem je svakako najsporiji deo softverskog sistema za podršku trgovanju energijom, tako da odluka o uproštavanju pristupa DLT podsistemu ne bi trebalo da značajnije degradira performanse celog sistema.

Primarna svrha upotrebe prototipa je testiranje performansi predložene arhitekture za podršku trgovanju. Stoga je DLT podsistem dizajniran tako da svi čvorovi koji su povezani na mrežu učestvuju kao posmatrači transakcija ukoliko nisu njeni direktni učesnici. Prilikom pravljenja energetskog obećanja i aukcije, obavezni učesnici transakcije su: prozjumer koji pravi obećanje, MNT, i učesnici mreže koji žele da kupe električnu energiju. Prototip je implementiran tako da su svi učesnici mreže posmatrači takvih transakcija, što je iz perspektive performansi sistema najgori mogući scenario. Prilikom formiranja transakcija za licitacije, ponavlja se isti princip. Svi učesnici mreže su takođe i posmatrači transakcija u kojima nekoliko potrošača nadmeće da ponudi najveću cenu za energetsko obećanje.

Poglavlje 5

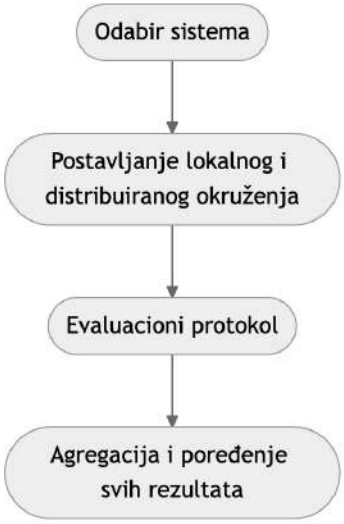
Metodologija za merenje performansi distribuiranih softverskih sistema

Upotreba predložene arhitekture za podršku trgovanju energijom pretežno proizvedenom iz obnovljivih izvora donosi sa sobom prednosti kao što su povećana sigurnost i distribuiranost sistema. Međutim, pomenute prednosti gube na značaju ukoliko se njihovim uvođenjem neke druge performanse sistema značajno oslabljuju ili sistem počinje da troši previše resursa za svoje pravilno funkcionisanje. Ovo je značajno ukoliko se uzme u obzir činjenica da je sistem pretežno namenjen za upotrebu od strane prozjumera koji su mali proizvođači i po definiciji prave male profitne margine. Utvrđivanje stvarnih performansi predloženog sistema je bio glavni motiv za osmišljavanje metodologije za merenje performansi predstavljene u ovom poglavlju. Metodologija obuhvata sistematično merenje potrošnje računarskih resursa, broja izvršenih transakcija u sekundi, kao i potrošnje električne energije. Šematski prikaz metodologije dat je na Slici 5.1. Metodologijom su određeni sledeći koraci:

- Odabir sistema ili njegovog prototipa koji obuhvata sve ključne funkcionalnosti.
- Postavljanje lokalnog ili distribuiranog okruženja za sprovođenje evaluacije.
- Evaluacioni protokol koji se sastoji iz tri faze. Prva i druga faza su merenje potrošnje resursa i protoka transakcija u lokalnom i distribuiranom okruženju, respektivno. Treća faza je merenje potrošnje električne energije prilikom rada sistema i usko je povezana sa drugom fazom pošto se za nju koristi isto distribuirano okruženje.
- Agregacija i obrada podataka.

Predlog metodologije se fokusira na merenje performansi distribuiranih softverskih sistema koji se koriste za podršku trgovanju električnom energijom. Stoga je neophodno prvenstveno izvršiti **odabir sistema koji se evaluira**. U idealnom slučaju, evaluirani sistem je u potpunosti implementiran ili postoji prototip datog sistema.

DLT softverski sistemi zbog svoje distribuirane prirode poseduju ključne funkcionalnosti koje mogu prouzrokovati pad performansi. Primeri takvih funkcionalnosti su: P2P slanje poruka između velikog broja čvorova, postizanje konsenzusa o prihvatanju transakcija, upisivanje prihvaćenih transakcija u distribuiranu glavnu knjigu, itd. U slučaju da se za testiranje performansi sistema koristi prototip sistema, bitno je



Slika 5.1: Pregled metodologije

osigurati da on obuhvata sve ključne distribuirane funkcionalnosti sistema.

Predložena metodologija obuhvata merenje performansi sistema u lokalnom i distribuiranom okruženju. Adekvatno **postavljanje eksperimentalnog okruženja** u velikoj meri olakšava merenje performansi i ubrzava eksperimentalni proces.

Postavljanje lokalnog okruženja ne predstavlja zahtevan zadatak zato što je predviđeno da se okruženje za razvoj DLT sistema takođe koristi i kao lokalno eksperimentalno okruženje. Očekivani rezultati u ovakvom okruženju neće biti realistični, već će pružiti osnovni uvid o performansama sistema. Iako je očekivano da okruženje za lokalno testiranje performansi ima na sebi instaliran neesencijalan softver za izvođenje eksperimenata, savetuje se da se pre njihovog izvođenja na lokalnom okruženju isključe svi procesi koji nisu potrebni za izvođenje eksperimenata.

Postavljanje distribuiranog okruženja je znatno zahtevniji posao u odnosu na postavljanje lokalnog okruženja. Distribuirano okruženje se sastoji od grupe računara koji su povezani u Beowulf klaster (engl. Beowulf) [125]. Idealno je povezati računare u lokalnu mrežu kako bi se izbegao šum pri merenju performansi izazvan zagušenjem globalnih mrežnih kanala. Minimalan broj računara neophodan da bi se okruženje smatralo distribuiranim je dva, a preporučuje se da bude što veći. Uključivanjem što većeg broja računara postiže se da simulirano okruženje ima karakteristike stvarnog okruženja u kojem značajan broj korisnika istovremeno koristi predloženi distribuirani softverski sistem. Pri izboru karakteristika računara koji su deo klastera, idealno

je izabrati računare koji nemaju iste karakteristike. Tako se bolje simulira realni scenario u kome različiti korisnici koriste različite fizičke i virtuelne mašine da bi na njima pokretali čvorove predloženog distribuiranog sistema. Softver koji je instaliran na računarima treba da bude isključivo softver koji je neophodan za pokretanje eksperimenata. Na taj način se najbolje oslikava potrošnja računarskih resursa čvora koji se pokreće na tom računaru. Takođe, za vreme trajanja eksperimenata, svi neesencijalni procesi treba da budu ugašeni kako ne bi unosili šum prilikom merenja performansi distribuiranog softverskog sistema.

5.1 Evaluacioni protokol

Evaluacioni protokol se sastoji od tri faze, pri čemu svaka faza uključuje niz eksperimenata koji mere različite aspekte računarskih performansi u različitim eksperimentalnim okruženjima (Slika 5.2). Prva faza se sastoji od eksperimenata izvedenih na jednom računaru. Druga faza se sastoji od niza eksperimenata izvršenih na računarskom klasteru. Treća faza je usko povezana sa drugom, zato što se u njoj sprovode eksperimenti iz druge faze uz merenje potrošnje električne energije pri izvršavanju odabranih eksperimenata. U nastavku su navedene i objašnjene pojedinačne faze evaluacionog protokola.

Faza merenja potrošnje računarskih resursa i protoka transakcija u lokalnom okruženju. Ovaj proces evaluacije je zamišljen da bude brz i lako izvodljiv, tako da se može izvršiti više puta prilikom razvoja aplikacije. Na taj način se u ranom procesu razvoja mogu otkriti problemi sa performansama koji se otklanjaju tokom samog razvoja sistema. Koraci u ovoj fazi evaluacije podrazumevaju:

- Odabir reprezentativnih funkcionalnosti čije se performanse mere vrši se kako bi se okvir eksperimenata sveo na razuman nivo. Softverski sistemi za podršku trgovanju električnom energijom, koji su bazirani na DLT, često imaju veliki broj funkcionalnosti, od kojih su mnoge marginalne i ne predstavljaju reprezentativne funkcionalnosti koje mogu negativno da utiču na performanse sistema. Predlaže se da fokus bude na funkcionalnostima koje se u velikoj meri oslanjaju na DLT podsistem, koji je distribuirana komponenta sistema i najviše negativno utiče na performanse. Nakon izbora ključnih DLT funkcionalnosti, ukoliko je njihov broj prevelik, vrši se selekcija kroz izbacivanje funkcionalnosti koje ne ispunjavaju bar jedan od numerisanih kriterijuma:
  - Poseduje komplikovanu logiku izvršavanja - cilj je praćenje performansi u slučaju izvršavanja kompleksne poslovne logike.
  - Poseduje veliki broj distribuiranih čvorova koji učestvuju u izvršavanju funkcionalnosti cilj je praćenje performansi u slučaju kada mnogo čvorova međusobno komunicira u mreži, čime se povećava vreme i potrošnja resursa neophodna za izvršavanje funkcionalnosti.

  - Predviđa se česta upotreba funkcionalnosti u sistemu - cilj je testiranje funkcionalnosti koje se najviše koriste. Ukoliko određene kompleksne funkcionalnosti imaju loše performanse, to ne znači da će generalne performanse sistema biti loše ukoliko se kompleksne funkcionalnosti retko upotrebljavaju.
  - Poseduje jednostavnu poslovnu logiku, a mali broj čvorova učestvuje u izvršenju funkcionalnosti - cilj je praćenje performansi jednostavnih funkcionalnosti i upoređivanje tih performansi sa performansama složenih funkcionalnosti.
- Odabir intenziteta kojim se funkcionalnosti testiraju. Odabrane funkcionalnosti se mogu testirati u različitim intenzitetima. Upotreba logaritamske skale i testiranje funkcionalnosti intenzitetom: 1, 10, 100 i 1000 je strategija koja se predlaže. Međutim, odabir intenziteta je usko povezan s konkretnom funkcionalnošću koja se testira, te bi trebalo na osnovu pojedinačnog slučaja i poznavanja sistema odrediti optimalni intenzitet.
- Odabir broja čvorova u distribuiranoj mreži najčešće je ograničen fizičkim ograničenjima lokalnog okruženja na kojem se čvorovi pokreću. Okruženje mora biti u stanju da minimalno podrži sve tipove čvorova koji su učesnici u distribuiranom sistemu. Nakon toga se savetuje povećanje broja čvorova tako da su najzastupljeniji čvorovi čiji se najveći broj predviđa u realnim slučajevima upotrebe.
- Predlaže se upotreba Šel (engl. shell) i Pajton (engl. python) skripti prilikom implementacije sistema koji će se koristiti za merenje performansi. Preporuka za upotrebu skripti dolazi iz fleksibilnosti koju one donose i širokog spektra funkcionalnosti koje se pomoću njih mogu implementirati. Šel skripte omogućavaju izvršavanje proizvoljne sekvence Linuks komandi, što ih čini idealnim za postavljanje eksperimentalnog okruženja, kompajliranje aplikacija i njihovo pokretanje sa udaljenog računara. Pajton programski jezik poseduje širok spektar biblioteka za merenje performansi potrošnje računarskih resursa. Pajton skripte za merenje performansi su izuzetno lake za prenos na druge računare i mogu se pokrenuti nezavisno od operativnog sistema i okruženja koje se nalazi na računaru. Stoga, kombinacija Pajton i šel skripti se univerzalno može pokretati na različitim platformama. Takođe, univerzalno napisane skripte se lako mogu ponovo upotrebati u narednim fazama evaluacionog protokola.
- Poslednji korak prve faze je evaluacija rezultata. Poželjno je da se prva faza evaluacionog procesa izvrši više puta tokom razvoja aplikacije. Takođe je poželjno da se nakon završetka svih eksperimenata odmah obrade rezultati kako bi se dobile informacije o potencijalnim problemima u implementaciji koji loše utiču na performanse softverskog sistema. Nakon uklanjanja pronađenih

problema, savetuje se ponovno pokretanje prve faze evaluacionog procesa.

Faza merenja potrošnje resursa i protoka transakcija u distribuiranom okruženju. Koraci u ovoj fazi inicijalno liče na korake sprovedene u prvoj fazi uz dodatna proširenja i upotrebu distribuiranog okruženja koje veoma liči na stvarno okruženje u kojem bi se sistem komercijalno koristio. Štaviše, ukoliko su skripte iz prve faze napisane na dovoljno generičan način, one se uz izmene mogu ponovo iskoristiti i u ovoj fazi evaluacionog protokola. Koraci podrazumevaju:

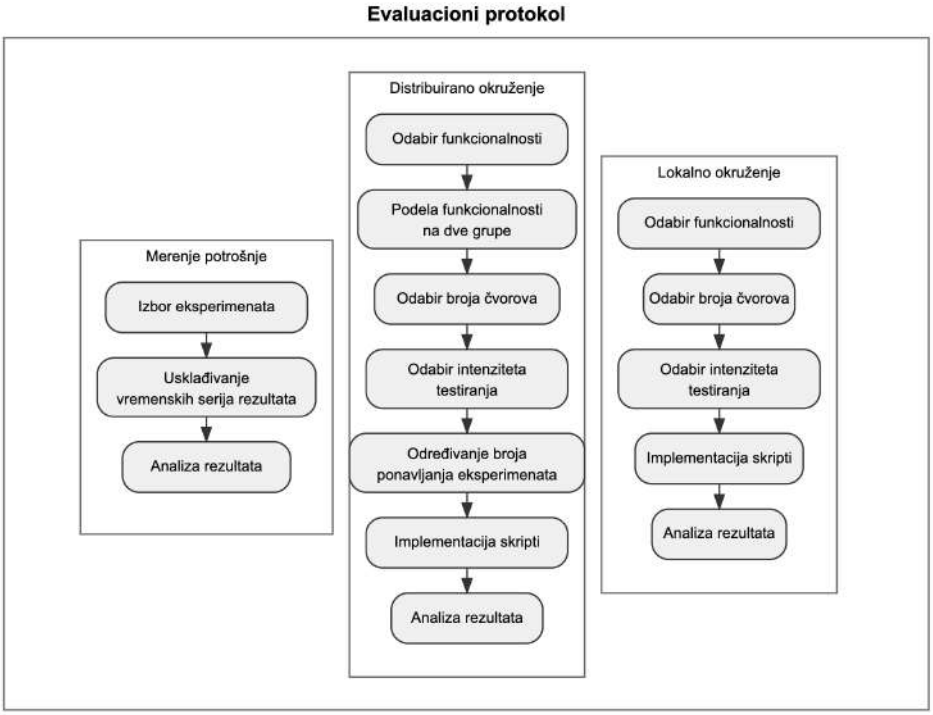
- Odabir reprezentativnih funkcionalnosti u ovoj fazi evaluacionog protokola se vrši na isti način kao u fazi testiranja performansi u lokalnom okruženju. Ukoliko se softverski sistem nije u velikoj meri izmenio od momenta testiranja performansi u lokalnom okruženju, predlaže se testiranje istih funkcionalnosti koje su testirane u prvoj fazi evaluacionog protokola.
- Intenzitet kojim se funkcionalnosti testiraju može se povećati u odnosu na intenzitet koji je korišten u lokalnom okruženju. Distribuirani sistem bi po definiciji trebao da omogući upotrebu više računarskih resursa i time dozvoli potencijalno povećavanje intenziteta kojim se sistem može testirati.
- Broj čvorova u distribuiranoj mreži mora biti bar za red veličine veći od broja čvorova koji su testirani u lokalnom okruženju. Cilj testiranja u distribuiranom okruženju je simulacija realne mreže. Stoga je bitno povećavati broj čvorova sve dok se ne postigne maksimum diktiran hardverskim ograničenjima računara u Beovulf klasteru.
- Određivanje broja ponavljanja svakog eksperimenta. Poželjno je svaki eksperiment ponoviti više puta kako bi se rezultati mogli usrednjiti. Time se smanjuje uticaj šuma i grešaka do kojih može doći prilikom sprovođenja eksperimenata. Dobro je da broj ponavljanja bude što veći, a minimalni predloženi broj ponavljanja je deset.
- Podela funkcionalnosti u dve grupe. Savetuje se odvajanje nekoliko funkcionalnosti koje nisu ključne (i tipova čvorova neophodnih za njih) u posebnu grupu čije performanse neće biti merene u prvoj grupi eksperimenata. Nakon toga, izvršiti drugu grupu identičnih eksperimenata koja uključuje kompletan skup funkcionalnosti i tipova čvorova. Time se testira koliko proširenje poslovne logike softverskog sistema i potencijalno dodavanje novih tipova čvorova i korisnika utiče na performanse sistema. Iako bi ovakvo merenje pružilo vrlo korisne statističke podatke, ovaj korak je nekonvencionalan i ne mora biti obaveza u evaluacionom procesu.
- Implementacija računarskih skripti za testiranje odabranih funkcionalnosti. Kao što je već naglašeno, savetuje se ponovna upotreba skripti korišćenih u prvoj fazi evaluacionog protokola.
- Implementacija računarskih skripti za distribuirano pokretanje i sinhronizaciju

procesa neophodnih za izvršavanje eksperimenata. Takođe je poželjno automatizovati ceo proces izvršavanja eksperimenata kako bi se umanjio prostor za ljudsku grešku i ubrzalo vreme izvršavanja eksperimenata.

- Implementacija računarskih skripti za distribuirano sakupljanje i agregaciju rezultata eksperimenata u cilju automatizacije procesa. Kako se u trenutnoj fazi svaki eksperiment sastoji od velikog broja merenja, poželjno je automatizovati proces sakupljanja rezultata i njihove agregacije. Proces agregacije rezultata može lako proizvesti greške u svakom od koraka i izuzetno je naporan za rad bez automatizacije.
- Analiza rezultata je poslednji korak faze testiranja performansi u distribuiranom okruženju i, za razliku od prve faze evaluacionog protokola, očekivano je da će količina prikupljenih podataka biti značajno veća i raznovrsnija. U ovoj fazi se očekuje primena širih statističkih metoda u odnosu na prvu fazu, i savetuje se spajanje analize rezultata ove faze sa prethodnom fazom.

Faza merenja potrošnje električne energije je poslednja faza evaluacionog procesa. Karakteristična je po tome što zahteva upotrebu posebnog industrijskog uređaja za merenje potrošnje električne energije i nije je moguće izvesti korišćenjem računarske opreme opšte namene kao što je bio slučaj u dosadašnjim fazama. Koraci u ovoj fazi evaluacije podrazumevaju:

- Bitno je definisati kriterijum za izbor eksperimenata koji ulaze u fazu merenja potrošnje energije. U idealnim okolnostima treća faza bi u sebi sadržala sve eksperimente koji su bili uključeni i u drugu fazu. Međutim, zbog potreba za upotrebom profesionalnih uređaja i potencijalnog dugog vremenskog intervala potrebnog da se izvrše svi automatizovani testovi iz druge faze (i do nekoliko nedelja), moguće je javljanje potrebe za izborom eksperimenata čija potrošnja će biti merena. U tom slučaju je minimalno neophodno izabrati eksperimente koji imaju minimalni i maksimalni broj čvorova iz druge faze. Dalji izbor eksperimenata bi trebalo vršiti takođe na osnovu broja čvorova, tako što se kao naredni eksperiment koji ulazi u treću fazu bira eksperiment čiji broj čvorova predstavlja srednju vrednost dva već uključena eksperimenta sa najvećom apsolutnom vrednošću količnika. U slučaju izbora trećeg eksperimenta koji ulazi u ovu fazu, trebalo bi izabrati eksperiment sa brojem čvorova koji predstavlja srednju vrednost minimalnog i maksimalnog broja čvorova. Dalji izbor eksperimenata vrši se upotrebom istog algoritma sve dok se ne postigne maksimalni broj eksperimenata čije izvršavanje je moguće zbog vremenskih ili hardverskih ograničenja. Broj čvorova najviše utiče na performanse sistema i najbolji je pokazatelj negativnih karakteristika sistema. Stoga se savetuje obuhvatanje što većeg broja eksperimenata sa različitim brojem čvorova izabranih po opisanom pravilu.



Slika 5.2: Pregled evaluacionog protokola

- Prikupljanje i agregacija podataka u procesu merenja potrošnje energije sa sobom nose dodatnu komplikaciju usklađivanja rezultata merenja potrošnje energije sa rezultatima dobijenim u prethodnoj fazi eksperimenata. Neophodno je precizno beležiti početak izvršavanja svakog eksperimenta iz druge faze koji je odabran u trećoj fazi. Time bi se vremenska serija izmerene potrošnje električne energije mogla mapirati na konkretne eksperimente iz druge faze.
- Analiza rezultata treće faze je idealno uraditi zajedno sa analizom rezultata druge faze. Nije neophodno spojiti ove dve analize i moguće ih je raditi pojedinačno. Međutim, njihovim spajanjem se dobija kompletna slika o performansama i olakšava izvođenje finalnih zaključaka o performansama sistema.

5.2 Uopštavanje metodologije za merenje performansi proizvoljnog DLT sistema

Opisana metodologija je namenjena za testiranje DLT softverskih sistema koji se koriste za podršku trgovanju električnom energijom. Međutim, metodologija je osmišljena tako da se fokusira na opšte karakteristike distribuiranih sistema koji nisu eksplicitno vezani za slučaj upotrebe koji je tema ove doktorske teze. Takođe, metodologija predlaže upotrebu opštih alata koji nisu nikako vezani za DLT sistem koji se testira niti za okruženje nad kojim se testiranje sprovodi. Ograničenje metodologije podrazumeva potpunu kontrolu svih računarskih sistema koji učestvuju u eksperimentima i očekuje se da se DLT sistem koristi samo od strane jedne aplikacije.

Okvir efikasnosti metodologije je eksplicitno definisan za privatne DLT sisteme sa kontrolom pristupa. Ona se u određenoj meri može koristiti i za merenje performansi drugih DLT sistema, međutim, u tom slučaju postoji nekoliko ograničenja opisanog pristupa. Javni DLT sistemi se sastoje od proizvoljnog broja čvorova gde ni korisnici ni kreatori aplikacije nemaju kontrolu nad celom mrežom. U takvim sistemima bi predložena metodologija proizvela neprecizne rezultate, pošto bi merila performanse mreže kada na njoj postoji samo jedna aplikacija (što nikad nije slučaj u praksi). Mana javnih DLT mreža iz perspektive merenja performansi aplikacije je to što je generalno teško izvesti precizna merenja koja se odnose samo na jednu aplikaciju zbog otvorene prirode mreže. Otvorena priroda prouzrokuje dinamičnost sistema i onemogućava višestruko ponavljanje merenja u istim okolnostima. Dodatno, kada je u pitanju merenje potrošnje električne energije, u javnim blokčejn mrežama ne postoji mogućnost pristupa svim čvorovima mreže, niti je tačno poznat broj čvorova u mreži. Time se u velikoj meri proces merenja performansi otežava i metode za dobijanje preciznih rezultata u takvim sistemima izlaze van okvira predložene metodologije.

Kako bi se bolje pokazalo uopštenje predložene metodologije, opisaće se njena upotreba za testiranje performansi DLT sistema koji nisu vezani za elektroenergetiku. Kao primer na kojem će se metodologija primeniti, odabrano je okruženje iz rada [99]. Rad takođe predlaže metodologiju za testiranje performansi distribuiranih sistema, pri čemu metodologija predložena u disertaciji pokriva širi spektar performansi i sagledava performanse sistema iz više uglova i u različitim fazama razvoja sistema.

U radu [99] se mere performanse Hajperledžer Febrik i privatne Itirijum mreže. Aplikacija koja je implementirana na obe mreže izuzetno je jednostavna i sastoji se od prostog prebacivanja sredstava sa jednog računa na drugi. Okruženje u kojem se pomenute mreže pokreću je klaud (konkretno Amazon klaud). Kako bi se predložena metodologija mogla u potpunosti primeniti, neophodno je da postoji potpuna kontrola nad računarima na kojima se pokreću aplikacije, kao i fizički pristup samim mašinama. Kod klaud sistema ovo nije slučaj, zato što nije moguće pristupiti samo fizičkim

mašinama na kojima će se mreža pokrenuti i meriti njihovu potrošnju električne energije. Stoga, predloženu metodologiju nije moguće u potpunosti primeniti. Međutim, činjenica da se u [99] koristi klaud okruženje, kao i da se koriste aplikacije koje su bazirane na Hajperledžer Febrik i privatnoj Itirijum tehnologiji, čini ceo DLT sistem značajno različitim od sistema nad kojim se metodologija primenjivala u disertaciji (detaljno opisano u Poglavlju 6.2). Prethodno navedeno čini aplikacije opisane u radu dobrim kandidatima nad kojim bi se metodologija iz disertacije mogla primenjivati.

Metodologija predviđa merenje performansi u lokalnom i distribuiranom okruženju. Stoga bi se za lokalno okruženje iskoristila jedna virtuelna mašina sa jačim performansama. Za distribuirano okruženje može se iskoristiti nekoliko virtuelnih mašina koje su povezane u jednu lokalnu mrežu. Proces pokretanja infrastrukture DLT sistema, kao i prikupljanja rezultata, vrši se preko Pajton i Šel skripti na isti način na koji bi se to radilo u okruženju opisanom u poglavlju 6.2. Evaluacioni protokol faze merenja potrošnje računarskih resursa na jednom i više računara veoma je sličan za obe implementacije sistema, pošto je logika implementirana u Hajperledžer i Itirijum aplikacijama izuzetno jednostavna i ne poseduje mnogo funkcionalnosti. Broj čvorova u aplikaciji bi zavisio isključivo od specifikacija virtuelnih mašina koje bi se koristile na klaudu. Logika određivanja broja čvorova ne razlikuje se za Itirijum i Hajperledžer Febrik. Evaluacija dobijenih rezultata bi se radila na sličan način za obe mreže. Štaviše, evaluacija dobijenih rezultata se ne razlikuje mnogo u odnosu na način evaluacije rezultata opisan u Poglavlju 6.2. Glavno ograničenje koje klaud okruženje donosi pri primeni predložene metodologije jeste nemogućnost pristupa fizičkim računarima u cilju merenja potrošnje energije. Klaud sistemima se pristupa preko unapred definisanih mehanizama koji ne pružaju podatke o potrošnji energije. Svaka virtuelna mašina dodeljena od strane klaud provajdera ima detaljnu specifikaciju na osnovu koje se može proceniti potrošnja energije. Međutim, ova metoda onemogućava precizno praćenje promene potrošnje kroz sprovođenje različitih eksperimenata i pruža samo grub uvid u potrošnju energije.

Na osnovu navedenog može se doći do zaključka da, uz pomenuta ograničenja, metodologija za merenje performansi nije striktno vezana za slučaj upotrebe za koji je korišćena u disertaciji, već se može upotrebiti i za testiranje drugih DLT sistema.

Poglavlje 6

Eksperimenti

Razvijanje aplikacija koje koriste javne blokčejn mreže (i sličnim javno dostupnim distribuiranim sistemima) relativno je jednostavno iz perspektive programera. Osnovna arhitektura je obezbeđena i predefinisana od strane same mreže. Stoga je kompletan napor pri razvoju aplikacije fokusiran samo na implementaciju pametnih ugovora (logike aplikacije). Naknada za korišćenje mrežne infrastrukture najčešće se plaća putem nativne kriptovalute. Opisane karakteristike javnih blokčejnova se u početku razvoja čine kao prednost, ali one posledično onemogućavaju tačno predviđanje performansi sistema ili davanje bilo kakvih garancija u vezi s njegovim performansama. Performanse aplikacije su usko povezane sa performansama cele mreže, dok na performanse mreže utiču mnogi eksterni faktori koji nikako nisu povezani sa aplikacijom.

Pored toga, troškovi rada javnih blokčejn mreža variraju u zavisnosti od potražnje. U periodima povećane potražnje, korisnici se praktično nadmeću jedni sa drugima za resurse, a čak i oni koji ponude najveću cenu transakcije mogu osetiti degradaciju performansi. Ovakvo ponašanje može povećati troškove održavanja sistema za red veličine i učiniti efikasno testiranje performansi sistema netačnim ili čak nemogućim [126].

Suprotno tome, privatni DLT i blokčejn sistemi su u potpunosti pod upravom menadžera mreže koji je odgovoran za postavljanje i održavanje sistema. Održavanje mreže je izazovan posao, a barijera za pokretanje takvog sistema je visoka zbog obimnog rada potrebnog za inicijalno pokretanje i postavljanje svih čvorova. Međutim, kada je inicijalni posao završen, privatne DLT mreže mogu pružiti viši nivo stabilnosti, kontrole i predvidivosti troškova. Stoga je privatna DLT mreža izabrana kao osnov za razvoj predložene arhitekture za softversku podršku trgovanju energijom. Time se dobija potpuna kontrola nad mrežom i otvara se mogućnost za dobijanje determinističkih i preciznih metrika performansi sistema.

6.1 Eksperimentalno okruženje

Sproveden je niz eksperimenata koji se fokusiraju na merenje performansi implementiranog prototipa sistema. Prva grupa eksperimenata je izvršena na jednom računaru i predstavljala je inicijalni korak testiranja performansi. Rezultati ovih

eksperimenata su objavljeni u radu [122]. Mana prve grupe eksperimenata je to što su izvršeni na jednom računaru koji nije reprezentativno testno okruženje za testiranje performansi distribuiranih sistema. Takva okruženja se koriste samo za preliminarne rezultate, jer ne uzimaju u obzir mrežnu latenciju, sinhronizaciju vremena između čvorova, različitost fizičkih mašina na kojima se čvorovi pokreću, nekonzistentne podatke na različitim čvorovima i druge probleme povezane s distribuiranim sistemima. Druga grupa eksperimenata je izvršena na Beovulf računarskom klasteru uz značajno proširenje eksperimentalnog procesa. Rezultati ovih eksperimenata su objavljeni u radu [49]. Distribuirano okruženje je kreirano kako bi se adekvatno testirale performanse implementiranog prototipa. Ono omogućava bolju procenu mogućnosti skaliranja predloženog sistema i otkriva probleme pri njegovom radu u uslovima približnim očekivanim okolnostima u realnosti.

6.1.1 Specifikacija okruženja sa jednim računarom

Prva grupa eksperimenata je izvršena na softverskom okruženju sa jednim računarom. U Tabeli 6.1 se može videti konfiguracija računara na kom su rađeni eksperimenti. Bitno je naglasiti da je računar koji je korišćen za inicijalno testiranje performansi bio i računar na kome je vršen razvoj sistema. Na njemu je instalirano mnoštvo softvera koji nije ključan za razvoj sistema. Operativni sistem korišćen za testiranje sistema na jednom računaru je Ubuntu 20.04 LTS. Softver koji je korišćen za sprovođenje eksperimenata na jednom računaru se nalazi u Tabeli 6.2.

Tabela 6.1: Konfiguracija računara na kom je rađena prva grupa eksperimenata

Komponenta	**Komponenta**	**Inicijalna eksperimentalna mašina**
RAM	Slotovi	2
	Iskorišćeni slotovi	2
	Količina	16 GiB
	Tip	DDR4
	Brzina	2666 MHz
CPU	Model	Intel Core i5-9400
	Arhitektura	x86-64
	Veličina fizičke adrese	46 b
	Veličina virtuelne adrese	48 b
	Jezgara	6
	Tredova po jezgru	1
	Broj logičkih jezgara	6
	Maksimalna frekvencija	4100 MHz
	Minimalna frekvencija	2900 MHz

Tabela 6.2: Softver korišten na računaru na kom je izvršena prva grupa eksperimenata

Upotreba	Softver	Verzija
Operativni sistem	Ubuntu	20.04 LTS
DLT infrastruktura	R3 Korda	4.8
Pokretanje Korda čvorova	Java	8u321
Pokretanje proksi servera	Spring boot	2.1.3.
Pokretanje Korda čvorova i proksija	Gradle	5.0.12

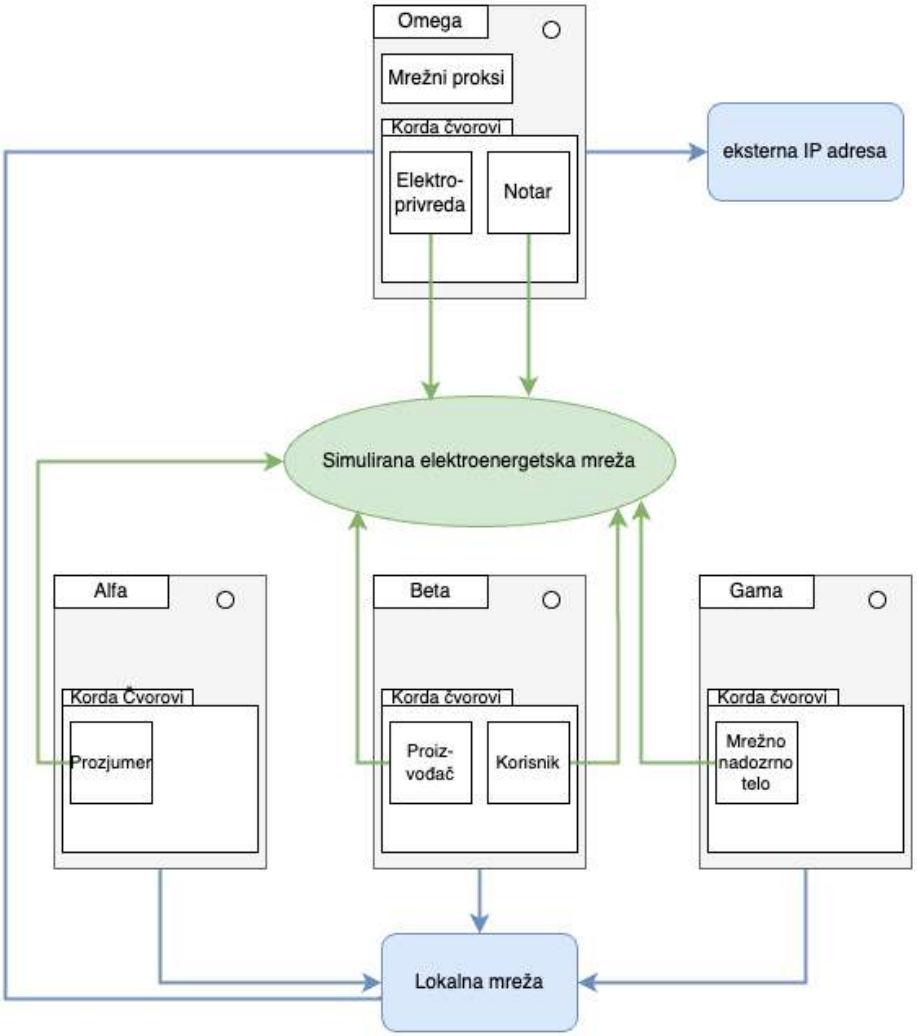
6.1.2 Specifikacija okruženja na računarskom klasteru

Svi eksperimenti iz druge grupe su izvedeni na Beovulf klasteru sastavljenom od četiri računara. Različiti računari pokreću različite Korda čvorove, tako da su radi praktičnosti nazvani: Omega, Alfa, Beta i Gama. Učesnici Korda mreže nazivaju se čvorovima, kao i računari koji su deo Beovulf klastera. Da bismo izbegli zabunu, u daljem tekstu će se Korda čvorovi nazivati jednostavno čvorovima, dok će se čvorovi u Beovulf klasteru nazivati fizičkim čvorovima.

Pregled fizičkih čvorova i njihovih veza unutar klastera na visokom nivou prikazan je na Slici 6.1. Svi fizički čvorovi povezani su lokalnom mrežom i mogu međusobno da komuniciraju. Omega fizičkom čvoru je dodatno dodeljena javna IP adresa i služi kao ulazna tačka (engl. gateway) za ostatak mreže. Stoga, za povezivanje s mrežom iz spoljnog okruženja koristi se Omega čvor.

Proksi veb server, koji se koristi za interakciju sa DLT podsistemom, takođe je pokrenut na fizičkom čvoru Omega. Kroz čvor Omega, proksi veb server ima pristup svim ostalim Korda čvorovima sa kojima je Omega povezan u lokalnoj mreži. Proksi veb server je istovremeno lako dostupan svim aplikacijama i korisnicima koji žele da koriste mrežu putem REST API-ja zato što je fizičkom čvoru Omega dodeljena javna IP adresa i moguće mu je pristupiti kroz globalnu internet mrežu.

U svim eksperimentima, svaki fizički čvor u klasteru ekskluzivno se koristi za pokretanje različitih Korda čvorova. Sav softver koji nije ključan za eksperimente deinstaliran je na svim fizičkim čvorovima. Ovo vrlo verovatno neće biti slučaj u stvarnim okruženjima, ali doneta je odluka za upotrebu „čistog" okruženja kako bi se mogla izvršiti što preciznija merenja i smanjiti šum. Slika 6.1 prikazuje stanje mreže u prvom eksperimentu druge grupe eksperimenata (auto-exp-0). U njemu, Omega pokreće Korda čvorove elektroprivrede i Notara, Alfa pokreće samo prozjumera, Beta pokreće proizvođača i korisnika, dok Gama pokreće MNT. U svakom sledećem testu povećava se broj Korda čvorova na svakom fizičkom čvoru u klasteru, dok se opšta infrastruktura ne menja. Jedan fizički čvor može podržati do 7 Korda čvorova, s ukupnim maksimalnim brojem od 33 Korda čvora u celoj eksperimentalnoj postavci. Ovako postavljeno okruženje oslikava mikro-mreže srednje veličine. Broj čvorova u



Slika 6.1: Fizički računari u klasteru i Korda čvorovi koji se nalaze u njima za vreme trajanja eksperimenta **auto-exp-0** [49]

eksperimentalnom okruženju se postepeno povećava u cilju posmatranja performansi aplikacije pri povećanju broja čvorova u mreži.

Pri povećanju broja čvorova, vodilo se računa da tipovi čvorova prisutni u eksperimentima oslikavaju scenarije iz stvarnog sveta. Prozjumeri i korisnici su predstavljeni

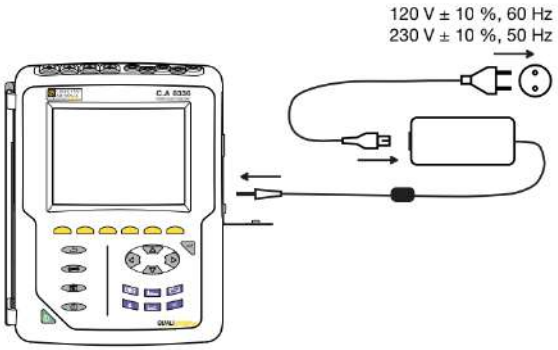
u većem broju nego elektroprivreda i proizvođači, jer se očekuje da će u stvarnom svetu broj ovih entiteta biti manje zastupljen. Svi Korda čvorovi u mreži moraju biti povezani s MNT radi praćenja proizvodnje i potrošnje energije. Prikupljeni podaci predstavljaju ulaz u softverski sistem i zahtevaju pametna električna brojila. Implementirani prototip simulira vezu s elektroenergetskom mrežom, što čini testiranje performansi bržim i jednostavnijim.

Fizički čvorovi u klasteru su višenamenski računari i nemaju svi identične konfiguracije. Ovakvo podešavanje bliže oslikava stvarni scenario, u kom različiti učesnici pokreću čvorove predloženog sistema na svojim računarima koji ne moraju imati iste specifikacije. Detaljne specifikacije fizičkih čvorova korišćenih u testiranju prikazane su u Tabeli 6.3.

Tabela 6.3: Konfiguracija računara u klasteru

Komponenta	**Karakteristika**	**Omega**	**Alfa,Beta, Gama**
RAM	Slotovi	8	4
	Iskorišćenih slotova	2	2
	Količina	32 GiB	32 GiB
	Tip	DDR4	DDR4
	Brzina	2133 MHz	2400 MHz
CPU	Model	Intel E5-1620	AMD Ryzen 7
	Arhitektura	x86-64	x86-64
	Vel. fiz. adrese	46 b	43 b
	Vel. virt. adrese	48 b	48 b
	Jezgara	4	8
	Tredova po jezgru	2	2
	Logičkih jezgara	8	16
	Maks freq.	3600 MHz	3600 MHz
	Min freq.	1200 MHz	2200 MHz

Sva četiri čvora u Beovulf klasteru opremljena su istim softverom. Čvorovi koriste Ubuntu Server 22.04 LTS kao jedini operativni sistem instaliran na svim računarima u klasteru. Ostali korišćeni softver i njihove verzije prikazani su u Tabeli 6.4.



Slika 6.2: C.A. 8336 instrument za merenje potrošnje [127]

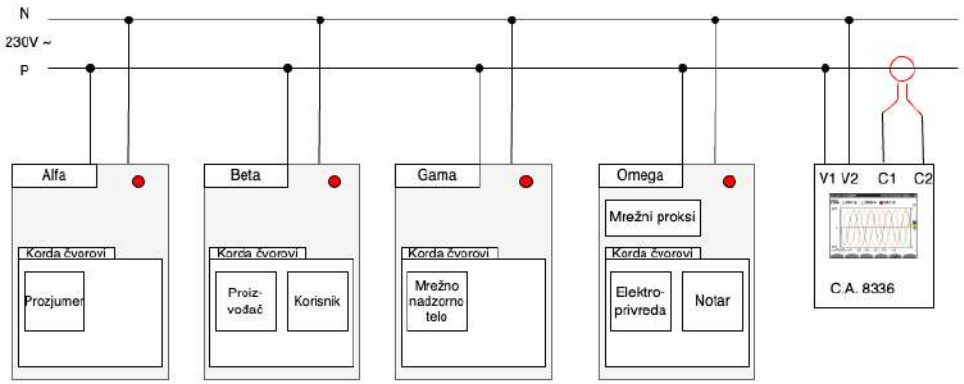
Tabela 6.4: Softver korišten na svim računarima klastera na kojim je izvršena druga grupa eksperimenata

Upotreba	Softver	Verzija
Operativni sistem	Ubuntu	22.04 LTS
DLT infrastruktura	R3 Korda	4.8
Pokretanje Korda čvorova	Java	8u321
Pokretanje proksi servera	Spring boot	2.1.3.
Pokretanje Korda čvorova i proksija	Gradle	5.0.12

Za merenje potrošnje energije i drugih električnih parametara korišćen je C.A. 8336 (Qualistar+) [127], trofazni analizator mreže sa grafičkim prikazom (videi liku 6.2). Ovaj uređaj može imati tri uloge i koristiti se za:

- Merenje RMS vrednosti i snage u elektroenergetskim distributivnim mrežama.
- Prikaz trenutnih ključnih karakteristika trofazne struje.
- Praćenje varijacija različitih parametara tokom vremena.

Glavna svrha instrumenta bila je praćenje potrošnje energije klastera računara za vreme trajanja određenih eksperimenata. Sva četiri fizička čvora bila su povezana na jedan izvor napajanja, a instrument je merio karakteristike potrošnje energije cele eksperimentalne mreže. Šema koja prikazuje kako je povezan instrument za merenje s eksperimentalnim klasterom prikazana je na Slici 6.3.



Slika 6.3: Povezivanje mernog instrumenta pri merenju potrošnje energije klastera [49]

6.2 Primena opisane metodologije nad predloženim softverskim sistemom

Eksperimentalni proces merenja performansi na jednom računaru i na Beovulf klasteru se značajno razlikuje. Prva grupa eksperimenata sastoji se od malog broja merenja koja ne obuhvataju praćenje potrošnje energije. Druga grupa eksperimenata obuhvata mnogo širi opseg merenja koja u sebi sadrže i merenje potrošnje električne energije.

Iako je eksperimentalni proces u prvoj grupi eksperimenata bio dosta jednostavniji u odnosu na drugu grupu eksperimenata, uložen je napor da dobijeni rezultati budu u sličnom formatu i sadrže slične grupe testova kao i u drugoj grupi.

6.2.1 Testiranje performansi na jednom računaru

Testiranje performansi na jednom računaru je izvedeno kao inicijalni korak testiranja performansi predloženog distribuiranog sistema. Ova grupa eksperimenata ima mnogo ograničenja od kojih je primarno to što su testovi izvršeni na jednom računaru, a vrši se testiranje performansi distribuiranog sistema. Inicijalna grupa testova je takođe ograničena po maksimalnom broju čvorova koji se mogu pokrenuti u jednom eksperimentu. Mašina na kojoj je izvedena prva grupa testova ima samo 16 GB radne memorije, te bi pokretanje većeg broja čvorova na njoj predstavljalo izazov.

Eksperimenti koji su vršeni na jednom računaru su rađeni za vreme razvoja sistema i nisu testirali finalnu verziju prototipa. Testiranom prototipu nedostaju članovi verifikacione agencije, skladišta energije, trgovci i sve prateće funkcionalnosti koje su dodate uz pomenute članove. Kako je RAM memorija takođe ograničen resurs,

ukupno su izvedena samo tri eksperimenta i nije vršeno višestruko ponavljanje jednog eksperimenta kako bi se usrednjili rezultati i odredila njihova varijansa. Izvršeni eksperimenti se razlikuju po broju Korda čvorova pokrenutih na svakom fizičkom čvoru. Raspored čvorova po eksperimentima je:

- **exp-0** - Predstavlja minimalan broj čvorova koji moraju biti deo mreže kako bi prototip pravilno funkcionisao. Ovo podrazumeva pokretanje svih tipova Korda čvora samo jednom. Pokrenuti Korda čvorovi su: Elektroprivreda, Notar, Prozjumer, Proizvođač, Korisnik i Mrežno nadzorno telo.
- **exp-1** - Dodaje nove čvorove proizvođača i korisnika na postojeće čvorove iz exp-0. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći: Elektroprivreda, Notar, Prozjumer, Proizvođač, Korisnik, Mrežno nadzorno telo, Proizvođač1 i Korisnik1.
- **exp-2** - Dodaje nove čvorove proizvođača i korisnika na postojeće čvorove iz exp-1. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći: Elektroprivreda, Notar, Prozjumer, Proizvođač, Korisnik, Mrežno nadzorno telo, Proizvođač1, Korisnik1, Proizvođač2, Korisnik2.

Pored očiglednih mana kao što su mali broj čvorova i pokretanje distribuiranog sistema na jednom računaru, prva grupa testova ima i svojih prednosti. Glavna prednost je u tome što nije potrebno podešavati nikakvo posebno testno okruženje da bi se eksperimenti izveli. Upotrebljena je mašina na kojoj se radio razvoj sistema. Druga prednost prve grupe testova je to što ne obuhvataju veliki broj merenja i ona se mogu brzo izvršiti. Brzina i lakoća pokretanja testova omogućava da se oni pokreću i u finalnim fazama razvoja sistema. Nije neophodno čekati potpuni završetak razvoja, već je poželjno više puta izvršiti testove kako bi se odmah uvidelo da li postoji usko grlo pri izvršavanju određenih funkcionalnosti sistema. U tom slučaju bi se problemi odmah mogli otkloniti u ranim fazama razvoja.

6.2.2 Testiranje performansi na Beovulf klasteru računara

U ovoj podsekciji opisan je eksperimentalni proces i objašnjeni razlozi za merenje performansi na Beovulf klasteru računara. Izvedena su dva različita skupa merenja performansi. Prvi skup bio je fokusiran na performanse mreže iz perspektive računarstva. Merena je upotreba računarskih resursa tokom izvođenja različitih vrsta transakcija nad prototipom sistema. Drugi skup eksperimenata koristi instrument za merenje potrošnje energije i ostalih karakteristika elektroenergetske mreže koja je napajala klaster tokom nekih eksperimenata iz prvog skupa i daje pogled na ponašanje sistema iz energetske perspektive.

Sistem je kreiran tako da je svaki učesnik u mreži predstavljen jednim Korda čvorom. Pošto je mreža distribuirana i novi učesnici su podstaknuti da se pridruže, pretpostavka je da će dodavanje novog korisnika biti najčešća promena u mreži. Dakle,

sistem prirodno raste kroz povećavanje korisnika (samim tim i Korda čvorova) u mreži. Eksperimenti prate prirodan rast mreže i svaki naredni eksperiment se razlikuje od prethodnog po broj čvorova koji učestvuje u njemu. Nezavisno od specifičnog slučaja korišćenja, merenje performansi pri povećavanju broja čvorova je i generalno dobra strategija za sveobuhvatno testiranje performansi distribuiranog sistema.

Performanse sistema su praćene kroz eksperimente u kojima se broj čvorova postepeno povećavao. Inicijalni eksperiment je započet sa 7 čvorova, dok je u poslednjem eksperimentu učestvovalo 33 čvora. Dalje povećanje broja čvorova zahtevalo bi hardverska unapređenja, koja u trenutku izvršavanja eksperimenata nisu bila moguća. Pored toga, postojeći eksperimenti pružili su dovoljno podataka za uočavanje jasno formiranih trendova u potrošnji resursa koji se detaljno diskutuju u Sekciji 6.3.

Kao deo prvog skupa eksperimenata koji se fokusiraju na potrošnju računarskih resursa, ukupno je sprovedeno dvanaest eksperimenata, i oni su dodatno podeljeni u dve serije. Podela na dve serije je izvršena po funkcionalnostima koje su implementirane u sistemu za vreme sprovođenja eksperimenata. Prva serija koristi prototip u kome ne postoje čvorovi Trgovca, Verifikacione agencije i Skladišta energije. Novi čvorovi su dodati zajedno sa svim pratećim funkcionalnostima koje dolaze uz njih. Druga serija koristi konačnu verziju prototipa u kome su dodati svi čvorovi opisani u predlogu arhitekture softverskog sistema kao i implementirane sve funkcionalnosti za pravilan rad novih čvorova.

Merenje potrošnje računarskih resursa

Cilj podele merenja potrošnje računarskih resursa na dve serije je bila testiranje otpornosti sistema na dodavanje novih funkcionalnosti i tipova čvorova. Kao što je već navedeno u prethodnim poglavljima, očekivano je da će biti potrebe za menjanjem i nadograđivanjem postojeće arhitekture kako se budu dešavale promene na fizičkoj elektroenergetskoj mreži. Promene će se oslikavati kroz dodavanje novih tipova čvorova u mrežu ili kao proširenje postojećih funkcionalnosti. Stoga je druga serija eksperimenata osmišljena kao simulacija proširenja sistema sa novim tipovima čvorova i novim funkcionalnostima u cilju merenja eventualne degradacije performansi koje bi se desile u tom slučaju.

Prva serija sastoji se od šest eksperimenata, koji se razlikuju po broju Korda čvorova pokrenutih na svakom fizičkom čvoru. Sprovedeni eksperimenti su:

- **auto-exp-0** - Predstavlja minimalan broj čvorova koji moraju biti deo mreže kako bi prototip pravilno funkcionisao. Ovo podrazumeva pokretanje svih tipova Korda čvora samo jednom. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći:
  - Omega: Elektroprivreda i Notar.
  - Alfa: Prozjumer.

  - Beta: Proizvođač i Korisnik.
  - Gama: Mrežno nadzorno telo.
- **auto-exp-1** - Dodaje nove čvorove proizvođača i korisnika na postojeće čvorove iz auto-exp-0. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći:
  - Omega: Elektroprivreda i Notar.
  - Alfa: Prozjumer i Proizvođač1.
  - Beta: Proizvođač i Korisnik.
  - Gama: Mrežno nadzorno telo i Korisnik1.
- **auto-exp-2** - Dodaje nove čvorove proizvođača i korisnika na postojeće čvorove iz auto-exp-1. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći:
  - Omega: Elektroprivreda, Notar i Proizvođač2.
  - Alfa: Prozjumer i Proizvođač1.
  - Beta: Proizvođač, Korisnik i Korisnik2.
  - Gama: Mrežno nadzorno telo i Korisnik1.
- **auto-exp-3** - Dodaje pet prozjumer čvorova na postojeće čvorove iz auto-exp-2. Prozjumeri (pored korisnika) su čvorovi koji imaju najveću verovatnoću da se pojave kao novi članovi u stvarnim slučajevima upotrebe sistema. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je sledeći:
  - Omega: Elektroprivreda, Notar, Proizvođač2 i Prozjumer1.
  - Alfa: Prozjumer, Proizvođač1 i Prozjumer2.
  - Beta: Proizvođač, Korisnik, Korisnik2 i Prozjumer3.
  - Gama: Mrežno nadzorno telo, Korisnik1, Prozjumer4 i Prozjumer5.
- **auto-exp-4** - Dodaje pet korisničkih čvorova na postojeće čvorove koji se nalaze u auto-exp-3. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je:
  - Omega: Elektroprivreda, Notar, Proizvođač2, Prozjumer1 i Korisnik3.
  - Alfa: Prozjumer, Proizvođač1, Prozjumer2, Korisnik4 i Korisnik5
  - Beta: Proizvođač, Korisnik, Korisnik2, Prozjumer3 i Korisnik6
  - Gama: Mrežno nadzorno telo, Korisnik1, Prozjumer4, Prozjumer5 i Korisnik7.
- **auto-exp-5** - Dodaje tri proizvođača, tri prozjumera i četiri korisnička čvora na postojeće čvorove koji se već nalaze u auto-exp-4. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima je:
  - Omega: Elektroprivreda, Notar, Proizvođač2, Prozjumer1, Korisnik3, Proizvođač3, Proizvođač4 i Proizvođač5.
  - Alfa: Prozjumer, Proizvođač1, Prozjumer2, Korisnik4, Korisnik5, Prozjumer6, Prozjumer7 i Prozjumer8.
  - Beta: Proizvođač, Korisnik, Korisnik2, Prozjumer3, Korisnik6, Korisnik8 i Korisnik9.
  - Gama: Mrežno nadzorno telo, Korisnik1, Prozjumer4, Prozjumer5, Koris-

nik7, Korisnik10 i Korisnik11.

Prethodno opisani eksperimenti čine prvu seriju. Druga serija eksperimenata izvedena je nad finalnom verzijom prototipa (proširenom u odnosu na prvu seriju). Sprovedeni su isti eksperimenti kao u prvoj seriji, ali uz dodatak novih tipova čvorova i uvođenje dodatnih funkcionalnosti.

Svi novi eksperimenti u drugoj seriji imenovani su prema svom pandanu iz prve serije, uz dodatak slova **e**. Dakle, **auto-exp-e-0** je pandan eksperimentu **auto-exp-0**, **auto-exp-e-1** je pandan eksperimentu **auto-exp-1**, i tako dalje. Raspored Korda čvorova na fizičkim čvorovima u proširenim eksperimentima (druga serija) zadržava isti raspored kao u prvoj seriji, uz dodatak novih tipova čvorova. Stoga neće biti predstavljen detaljan raspored Korda čvorova za drugu seriju eksperimenata. On se dobija prostim dodavanjem ispod izlistanih čvorova svim eksperimentima iz prve serije:

- Alfa: Verifikaciona agencija.
- Beta: Trgovac.
- Gama: Skladište energije.

Iako se svi navedeni eksperimenti razlikuju po broju i tipu čvorova koji se pokreću tokom eksperimentalnog procesa, svi prate isti osnovni šablon koji je nazvan atomski tok eksperimenta. Atomski tok eksperimenta sadrži četiri koraka:

1. Korda čvorovi se pokreću na svim fizičkim čvorovima.
2. Izvršava se jedna od sledećih akcija:
    - Kreiranje energetskog obećanja u serijama od 1, 10 i 100 transakcija.
    - Kreiranje aukcije u serijama od 1, 10 i 100 transakcija.
    - Licitiranje u serijama od 1, 10 i 100 transakcija.
    - Performanse Korda čvorova mere se na sva četiri fizička čvora.
3. Prikupljaju se podaci o performansama.
4. Korda čvorovi se zaustavljaju na svim fizičkim čvorovima i njihove baze podataka se čiste. Dodatno, svi preostali podaci proizvedeni u prethodnim koracima uklanjaju se s fizičkih čvorova. Ovaj korak se sprovodi kako bi se osiguralo da naredni eksperiment bude izvršen u istim uslovima kao i prethodni.

Svi eksperimenti iz obe serije izvedeni su po deset puta. Ovo je urađeno kako bi se izmerila varijansa. Kao posledica prethodnog, izvođenje eksperimenata u idealnim uslovima (bez tehničkih problema) može trajati nedeljama. Ovo nije problem pri merenju upotrebe računarskih resursa, jer se ti eksperimenti mogu u potpunosti izvoditi uz upotrebu SSH protokola za udaljenu kontrolu računara.

Nasumični eksperiment, kao što je npr. auto-exp-0, sastoji se od trideset iznad definisanih pojedinačnih atomskih tokova. Na početku eksperimenta izvodi se deset atomskih tokova koji mere performanse komande pravljenja novog energeskog obećanja. Nakon toga, izvodi se po deset atomskih tokova koji mere performanse komandi

pravljenja aukcije i licitacije.

U distribuiranom okruženju je izvršeno ukupno $n = 1080$ različitih merenja. Polovina merenja odnosi se na prvu seriju eksperimenata, dok se druga polovina odnosi na drugu seriju eksperimenata (sve funkcionalnosti prototipa su implementirane u drugoj seriji). Podaci koji su obrađivani u narednoj sekciji su dobijeni filtriranjem i analizom logova računara na kojima su sprovedeni eksperimenti. Logovi su filtrirani tako da sadrže samo relevantne informacije, a zatim agregirani na nivou pojedinačne instance eksperimenta. Ovo je urađeno korišćenjem CLI Python koda, čiji izvorni kod se može zatražiti od autora, zajedno sa sirovim i obrađenim podacima, kao i R kodom korišćenim za njihovu obradu.

Automatizacija merenja potrošnje računarskih resursa

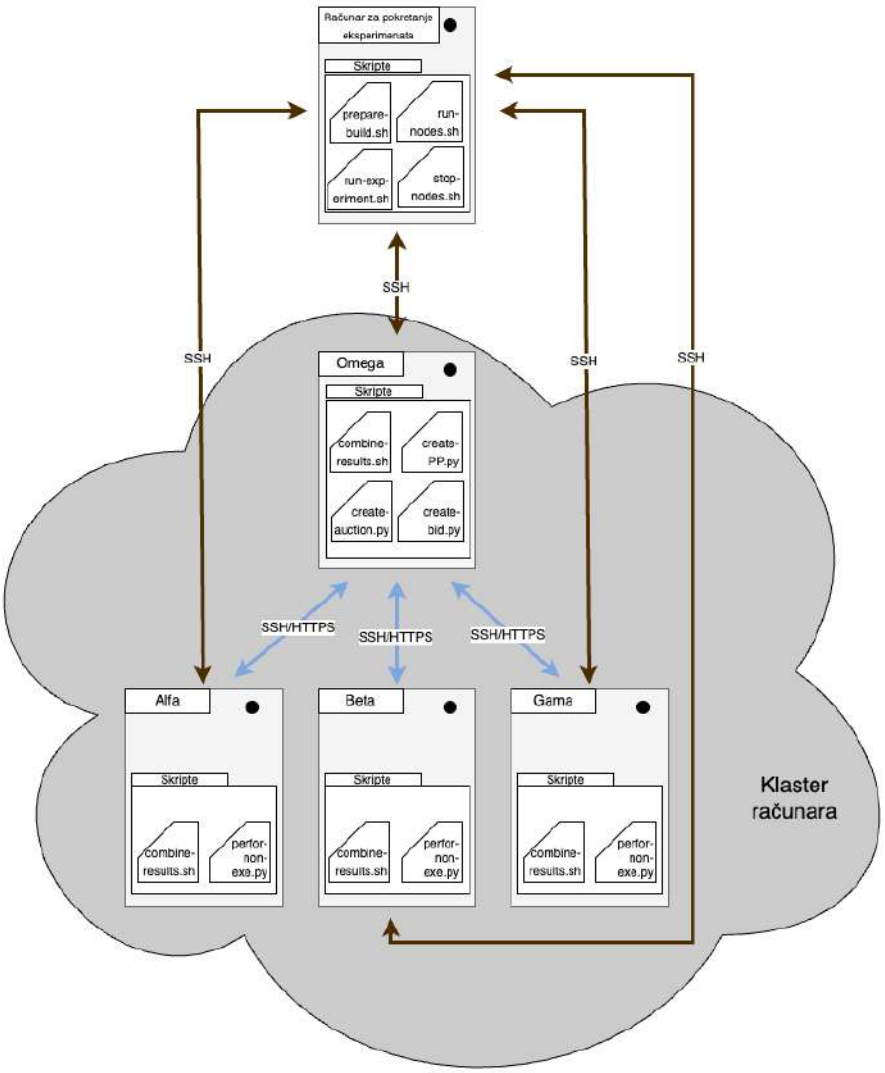
Opisani eksperimentalni proces se sastoji od brojnih koraka i može biti veoma zamoran ako se izvodi ručno. Zbog toga su svi eksperimenti sprovedeni automatski koristeći šel i Pajton skripte. Skripte su unapred napisane i distribuirane na sve fizičke čvorove na klasteru. Skripte se koriste za: orkestraciju procesa, merenje performansi, prikupljanje rezultata, obradu podataka i sve dodatne korake potrebne za izvođenje eksperimenata. Skripte koriste SSH i HTTP protokole za komunikaciju i prenos podataka između fizičkih čvorova i računara koji se nalazi van klastera i na kojem se iniciraju eksperimenti. Slika 6.4 prikazuje skripte korišćene za testiranje performansi i njihov raspored po fizičkim čvorovima.

Mašina za iniciranje eksperimenata nije deo računarskog klastera i ne pokreće nijedan Korda čvor. Stoga, njene specifikacije nisu relevantne za prikazivanje i diskusiju eksperimentalnih rezultata. Međutim, ona igra ključnu ulogu u eksperimentalnom procesu i raspoređivanju zadataka prilikom izvršavanja eksperimenata. Skripte *prepare-build.sh*, *run-nodes.sh*, *run-experiment.sh* i *stop-nodes.sh* pokreću se isključivo na mašini za iniciranje eksperimenata i koriste se za udaljeno pokretanje svih eksperimentalnih koraka na Beovulf klasteru putem SSH protokola.

Sve opisane šel i Pajton skripte korišćene za automatizaciju eksperimenata su javno dostupne na GitHub repozitorijumu [1] i čine ih:

- **prepare-build.sh**: Ulazna tačka za svaki od dvanaest sprovedenih eksperimenata. Koristi se za kompajliranje svih Korda čvorova prema unapred definisanom rasporedu Korda čvorova po fizičkim čvorovima, kopiranje binarnih datoteka potrebnih za pokretanje Korda čvorova na fizičke čvorove i instalaciju svih zavisnosti neophodnih za pokretanje eksperimenta.
- **run-nodes.sh**: Pokreće mrežni proksi na čvoru Omega, istovremeno pokreće sve Korda čvorove uključene u dati eksperiment na svim fizičkim čvorovima klastera. Svaki atomski eksperimentalni tok se inicira pokretanjem ove skripte.

[1] https://github.com/NebojsaHorvat/PowerAuction



Slika 6.4: Skripte korišćene za automatizaciju merenja i njihov raspored na fizičkim čvorovima klastera [49]

- **run-experiment.sh**: Pokreće se nakon skripte run-nodes.sh i odgovorna je za pokretanje i orkestraciju svih Pajton skripti distribuiranih na fizičkim čvorovima koje pokreću Korda tokove i mere potrošnju računarskih resursa. Prvo se pokreće

skripta create-PP.py (pravljenje energetskog obećanja) na čvoru Omega, koja putem HTTPS protokola poziva mrežni proksi i započinje kreiranje transakcija. Paralelno se pokreću skripte performance-non-exec.py (prikupljanje performansi bez izvršavanja) na čvorovima Alfa, Beta i Gama za prikupljanje podataka o performansama. Nakon završetka merenja performansi za kreiranje energetskog obećanja, run-experiment.sh skripta pokreće skripte create-auction.py (pravljenje aukcije) i create-bid.py (licitiranje) na isti način kao create-PP.py.

- **combine-results.sh**: Prikuplja podatke sa svih fizičkih čvorova dobijenih izvršavanjem eksperimenata. Uspešan završetak skripte run-experiment.sh znači da su podaci o performansama za sve tri komande (pravljenje EO, pravljenje aukcije i licitiranje) uspešno prikupljeni na lokalnom čvoru za dati eksperiment i da se mogu objediniti i prikupiti pomoću ove skripte.
- **stop-nodes.sh**: Nakon prikupljanja podataka o performansama i objedinjavanja rezultata, ova skripta se pokreće radi završetka atomskog eksperimentalnog toka. Zaustavlja Korda čvorove i briše sve podatke generisane prethodnim skriptama (uključujući baze podataka Korda čvorova). Ovaj korak omogućava izvođenje sledećeg atomskog eksperimentalnog toka u istim uslovima u kojima se izvršavao prethodni tok.

Merenje potrošnje električne energije

Merenje potrošnje energije je zahtevniji i složeniji proces u odnosu na merenje potrošnje računarskih resursa. Za razliku od merenja potrošnje računarskih resursa koja može da se izvrši kroz upotrebu SHH protokola za udaljenu kontrolu računara, merenje potrošnje energije zahteva rukovanje mernim instrumentom kojim mora da se radi iz serverske sobe u kojoj je podešen klaster. Instrument za merenje potrošnje je bio iznajmljen na kraći vremenski period, što je onemogućilo merenja potrošnje električne energije za sve eksperimente pošto bi taj proces trajao mesecima (toliko je trajalo izvođenje eksperimenata koji mere potrošnju računarskih resursa). Stoga samo podskup svih eksperimenata ima pridružene podatke o potrošnji energije. Ovaj podskup čine: auto-exp-0, auto-exp-3, auto-exp-5, auto-exp-e-0, auto-exp-e-3 i auto-exp-e-5. Stoga od ukupno $n = 1080$ merenja, samo $n' = 81$ uključuje merenje potrošnje energije.

Iako je skup prikupljenih podataka za merenje potrošnje značajno manji od skupa podataka koji meri računarske performanse, on je pažljivo odabran tako da obuhvata širok skup odrađenih testova. Najveći gubitak u broju izvršenih merenja pri praćenju potrošnje u odnosu na merenje performansi je u tome što ista merenja nisu ponavljana deset puta. Time se gubi mogućnost merenja varijanse rezultata, ali merenje potrošnje i dalje obuhvata ceo obim eksperimenata.

6.3 Eksperimentalni rezultati

Pre diskusije rezultata koja uključuje statističku analizu sprovedenih eksperimenata opisanih u prethodnoj sekciji, korisno je napraviti korak unazad i analizirati apsolutne rezultate eksperimenata. Kako su tabele apsolutnih rezultata obimne, prebaćene su u dodatak disertacije. U Dodatku A se nalazi Tabela A.1 koja prikazuje rezultate malog skupa merenja sprovedenih na jednom računaru. Čvorovi koji su prikazani u tabeli su čvorovi čiji se broj menjao tokom eksperimenata. Svaki od eksperimenata pored prikazanih čvorova sadrži i čvorove: Notara, Elektroprivrede, Prozjumera i Mrežnog nadzornog tela. Iako ovi rezultati nisu relevantni pokazatelj stvarnih performansi predloženog sistema, pošto su eksperimenti sprovedeni na jednom računaru i sadrže malu količinu podataka, oni predstavljaju dobru polaznu tačku za diskusiju o skalabilnosti platforme i demonstriraju kako sistem funkcioniše kada se suočava sa ozbiljnim ograničenjima resursa.

U Dodatku A se nalazi Tabela A.2 koja sadrži prosečne rezultate merenja potrošnje računarskih resursa na svim čvorovima u klasteru za prvu grupu od šest eksperimenata. Čvorovi koji su prikazani u tabeli su čvorovi čiji se broj menjao tokom eksperimenata. Svaki od eksperimenata pored prikazanih čvorova sadrži i čvorove: Notara, Elektroprivrede, Prozjumera i Mrežnog nadzornog tela.

U Dodatku A se nalazi Tabela A.3 koja sadrži apsolutne rezultate druge grupe merenja potrošnje računarskih resursa za šest eksperimenata koji koriste finalnu verziju prototipa. Čvorovi koji su prikazani u tabeli su čvorovi čiji se broj menjao tokom eksperimenata. Svaki od eksperimenata pored prikazanih čvorova sadrži i čvorove: Notara, Elektroprivrede, Prozjumera, Mrežnog nadzornog tela, Trgovca, Verifikacione agencije i Skladišta energije.

Originalni podaci za potrošnju RAM memorije i proteklog vremena izvršavanja transakcija prilično su obimni za potpuno predstavljanje jer su sva merenja sprovedena deset puta. Stoga su, radi jednostavnije prezentacije podataka, deset originalnih ćelija tabele kombinovane u jednu i izračunata je njihova srednja vrednost.

Merenje potrošnje električne energije je izvršeno samo za podskup svih izvršenih eksperimenata koji su rađeni na Beovulf klasteru računara. Na osnovu potrošene energije izračunat je i nivo CO_2 gasa koji se ispusti u atmosferu prilikom proizvodnje potrošene energije. Za razliku od merenja potrošnje računarskih resursa, merenje potrošnje električne energije nije rađeno 10 puta zbog ograničenja u vremenu upotrebe industrijskog instrumenta za merenje potrošnje. Otuda se dobijeni rezultati merenja potrošnje energije i CO_2 otiska mogu u potpunosti pronaći u Tabeli 6.5.

Tabela 6.5: Izmereni CO_2 otisak energije korišćene u eksperimentima

Eksperiment	Komanda	Zahtevi	Čvorovi	Vreme (s)	Gr.	Memorija (MB)	Potrošnja (J)	CO_2 (g)
auto-exp-0	CreateAuction	100	6	104.26685	1	8207.278	43549.4	4.420029
auto-exp-0	CreateBid	100	6	86.33326	1	8357.782	43296.1	4.394321
auto-exp-3	CreateAuction	100	15	234.75075	1	18631.086	90022.9	9.136838
auto-exp-3	CreateBid	100	15	219.92399	1	18647.433	104629.7	10.619350
auto-exp-5	CreateAuction	100	30	464.64646	1	35227.861	155311.0	15.763228
auto-exp-5	CreateBid	100	30	421.17342	1	35740.602	156665.7	15.900723
auto-exp-e-0	CreateAuction	100	9	133.19794	2	11791.016	58781.6	5.966015
auto-exp-e-0	CreateBid	100	9	133.64989	2	11662.049	86462.5	8.775477
auto-exp-e-3	CreateAuction	100	18	289.44234	2	22204.789	106169.9	10.775672
auto-exp-e-3	CreateBid	100	18	263.96090	2	21870.674	120994.4	12.280279
auto-exp-e-5	CreateAuction	100	33	521.85225	2	38960.144	155081.0	15.739885
auto-exp-e-5	CreateBid	100	33	502.22050	2	39343.661	185146.0	18.791320

6.4 Diskusija rezultata

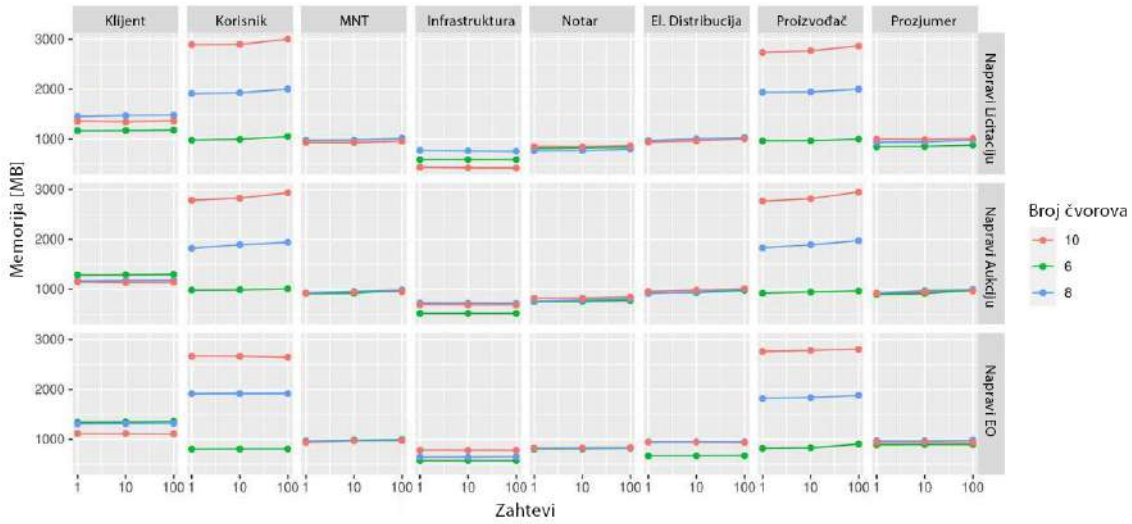
Ova sekcija je podeljena na dve podsekcije. Prva podsekcija diskutuje rezultate dobijene merenjem performansi na jednom računaru i otkriva tendencije pri skaliranju sistema i njegovu potrošnju računarske memorije. Druga podsekcija diskutuje potrošnju memorije i skaliranje sistema u distribuiranom okruženju uz merenje potrošnje električne energije i količine proizvedenog CO_2 gasa.

6.4.1 Eksperimenti izvršeni na jednom računar

Glavna mana testova izvršenih na jednom računaru je njihova nerealističnost usled simulacije distribuiranog sistema na jednoj lokalnoj mašini. Međutim, dobijeni rezultati testova se mogu iskoristiti za sticanje okvirnog uvida u performanse sistema. Kako su testovi brzi i laki za pokretanje, zamišljeno je da se oni koriste u finalnim fazama razvoja softverskog sistema. Na početku testiranja je bitno proveriti da li sistem poseduje greške nastale prilikom implementacije. Stoga je fokus stavljen na obradu broja transakcija koje sistem može da obradi u vremenu i potrošnju RAM memorije svakog čvora u mreži.

Kako je svaki čvor pokrenut na računaru predstavljen kao jedan proces, njihove performanse su podeljene na "klase upotrebe" koje govore o svrsi procesa:

- Infrastruktura: procesi pokrenuti kao deo orkestracije sistema koji se bave izvršavanjem podprocesa.
- Klijent: procesi izvršeni kao deo testa koji šalju zahteve sistemu u okviru testa opterećenja.
- Mrežno nadzorno telo: procesi odgovorni za održavanje čvora uprave mreže.
- Potrošač: procesi odgovorni za održavanje čvorova svih potrošača koji su deo sistema.

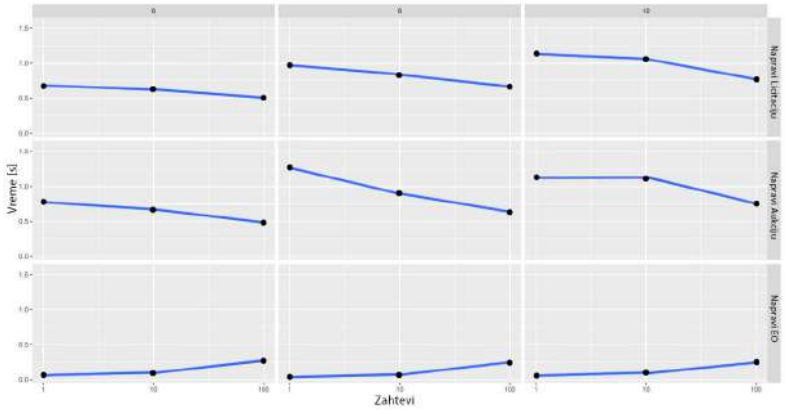


Slika 6.5: Grafikon potrošnje memorije u odnosu na broj paralelnih zahteva, podeljen po zadacima i klasama upotrebe. Boje označavaju broj čvorova [122]

- Proizvođač: procesi odgovorni za održavanje čvorova svih proizvođača koji su deo sistema.
- Prozjumer: procesi odgovorni za održavanje čvorova svih prozjumerskih čvorova u sistemu.
- Elektrodistribucija: procesi odgovorni za čvor elektroenergetske kompanije.
- Notar: procesi potrebni za pokretanje notarskog čvora, koji je neophodan deo Korda sistema.

Slika 6.5 prikazuje grafikon potrošnje memorije u odnosu na broj paralelnih zahteva. S obzirom na složenost test protokola, dijagram je podeljen tako da su kolone različite klase upotrebe, a redovi različite funkcionalnosti. Grafikon pokazuje obećavajuću skalabilnost pri porastu broja zahteva, što opterećuje sistem, ali ne utiče značajno na potrošnju memorije. Jedino značajno povećanje potrošnje memorije može se vide sa promenom topologije, odnosno, povećanjem broja čvorova u mreži.

Grafikoni na kojima je pokazana potrošnja memorije za proizvođače i potrošače su vrlo slični jer su to višestruko replicirani čvorovi istog tipa. Jednako rastojanje i jednako oblikovanje krivih pokazuju da je skaliranje memorije u ovom slučaju čisto linearno: što je više čvorova, to će biti potrebna veća količina memorije u strogoj proporciji. Ostali čvorovi ne pokazuju jaku korelaciju kao u slučaju prozjumera, ili su



Slika 6.6: Vreme po zahtevu u odnosu na broj zahteva, podeljen prema broju čvorova i funkcionalnostima [122]

identični kao u slučaju Mrežnog nadzornog tela.

Odnos između vremena izvršavanja transakcije i drugih varijabli menjanih kroz eksperimente je zanimljiviji u odnosu na potrošnju memorije. Slika 6.6 prikazuje odnos između vremena izvršavanja transakcija i ukupnog broja zahteva, podeljen po broju čvorova (kolone) i funkcionalnosti koja se obavlja (redovi). Određeni obrasci su odmah uočljivi: ponašanje vremena izvršavanja transakcije u odnosu na broj zahteva uglavnom ostaje nepromenjeno sa povećanjem broja čvorova u mreži. Oblik linije ostaje pretežno isti, dok je linija blago pomerena naviše, što ukazuje na tendenciju pada performansi sa povećanjem složenosti mreže.

Za licitacije i kreiranje aukcija, vreme po zahtevu opada kako se broj zahteva povećava, što sugeriše da postoji inicijalna cena postavljanja transakcije koji se amortizuje kroz više zahteva. Međutim, kreiranje energetskog obećanja (napravi EO) ne pokazuje takvo ponašanje i zapravo postaje sporije sa svakim novim zahtevom. Ovo ukazuje na potencijalno usko grlo u radu sistema koje, prema analizi koda, najverovatnije proizilazi iz samog procesa kreiranja energetskog obećanja.

Ova merenja ukazuju na određene zaključke i pravce istraživanja koje treba detaljnije ispitati. Sistem je prilično stabilan kada je u pitanju potrošnja memorije, što pomaže u planiranju resursa u slučaju šire primene. Ograničavajući faktor je povećanje vremena izvršavanja transakcija koje prave EO pri povećanju broja čvorova.

Kreiranje energetskih obećanja, takođe, zahteva dodatna testiranja. Ponašanje licitacija i kreiranja aukcija pokazuje da ne postoji tehnički razlog da se očekuje usporavanje operacija kako se povećava njihov broj. Naredna grupa testova opisana u

podsekciji 6.4.2 koja se izvodi na Beovulf klasteru računara je iskorišćena za detaljnije testiranje performansi pravljenja EO i objašnjenje detektovanih tendencija.

Generalno, sistem pokazuje odlične performanse pod opterećenjem i ne demonstrira zabrinjavajuće zahteve u pogledu procesorskog vremena, RAM memorije ili potrošnje energije. Inicijalni rezultati ukazuju na to da bi trebalo da bude moguće kreirati opisani sistem bez prekomernih finansijskih ili ekoloških troškova. Sa druge strane, eksperimenti izvršeni na jednom računaru su samo preliminarni, i neophodno je potvrditi dobijene rezultate kroz vise eksperimenata izvedenih na klasteru računara.

6.4.2 Eksperimenti izvršeni na Beovulf klasteru računara

U ovoj podsekciji se diskutuju rezultati merenja performansi i potrošnje energije, uvedeni u Podsekciji 6.2.2. Analiza je fokusirana na vreme i upotrebu memorije tokom eksperimenata, kao i na karbonski otisak energije korišćene u eksperimentima. Analiza vremena i memorije rezultat je prvog skupa merenja, koji se fokusirao na performanse mreže iz perspektive računarstva. Analiza karbonskog otiska rezultata je izvršena u drugom skupu merenja, koji je fokusiran na potrošnju energije sistema. Svaka izvršena analiza se fokusira na jednu specifičnu izlaznu varijablu i prati kako se ona menja u zavisnosti od broja obrađenih zahteva, broja čvorova u mreži i tipa eksperimenta.

Kako se skup elemenata izvršen na klasteru računara sastoji od velikog broja merenja, sprovedena je inicijalna analiza i spajanje svih rezultata korišćenjem Pajton skripti. Svi dobijeni rezultati i logovi eksperimenata su obrađeni u svrhu kreiranja sveobuhvatne baze podataka. Odabrani elementi iz ove baze podataka agregirani su i izvezeni u CSV formatu za analizu pomoću skripte napisane u R programskom jeziku.

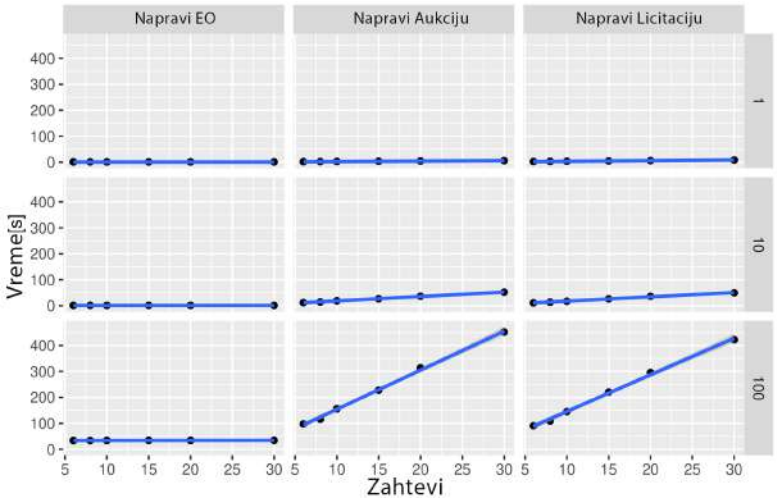
Analiza je podeljena u tri etape:

- analiza vremena,
- analiza memorije i
- analiza karbonskog otiska.

Analiza vremena

Na Slici 6.7 je prikazana promena vremena u zavisnosti od broja zahteva, čvorova i tipa komande. Ovaj grafikon omogućava analizu relativnog procesorskog vremena potrebnog za bilo koju datu komandu, kao i osetljivost ovog odnosa na broj čvorova, uz faktor skaliranja koji pokazuje kako se vrednosti menjaju s promenom broja zahteva.

Kao što se jasno može videti na grafikonu, broj čvorova je potpuno irelevantan za komandu pravljenja EO i ima veoma slab uticaj kada postoji samo 1 ili 10 zahteva. Tek kod 100 zahteva broj čvorova počinje da ima primetan efekat. S druge strane, broj čvorova ima znatno izraženiji uticaj na vreme potrebno za izvršavanje drugih komandi. U tim slučajevima jasno je da je odnos linearan, što znači da kašnjenje



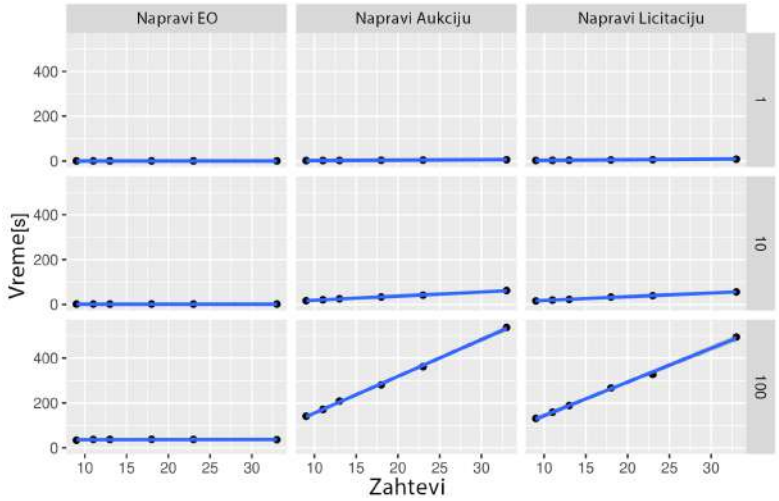
Slika 6.7: Vreme u odnosu na broj čvorova, zahteva i tip komande (nepotpuna implementacija) [49]

uzrokovano komunikacijom i konsenzusom skalira linearno. Ovo je važna informacija koja omogućuje planiranje budućeg rada i optimizacije sistema.

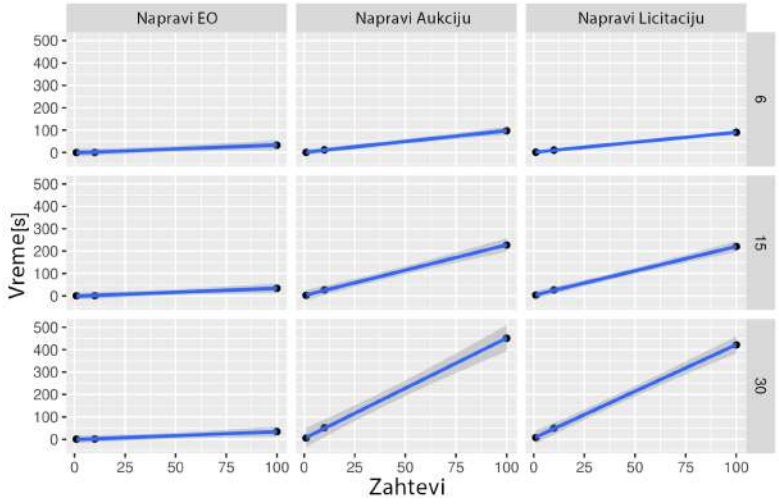
Isto se može uvideti posmatrajući isti eksperiment koji koristi potpunu implementaciju prototipa (videti Sliku 6.8). Pojavljuje se potpuno isti obrazac, bez ikakvih očiglednih odstupanja.

Sledeći korak analize jeste ispitivanje da li se mogu izvući dodatne informacije u vezi sa zahtevima u odnosu na vreme. U tu svrhu, podaci su filtrirani kako bi se odabrali slučajevi sa vrlo malim brojem čvorova, srednjim brojem čvorova i veoma velikim brojem čvorova. Zatim se prikazuje odnos između vremena i broja zahteva (videti Sliku 6.9). Analiza započinje sa slučajevima nepotpune implementacije.

Analiza grafikona jasno pokazuje predvidiv linearni porast vremena izvršavanja sa povećanjem broja zahteva. Ovo važi za sve komande i sve brojeve čvorova, iako se nagibi krivih razlikuju. Oštrina porasta varira u zavisnosti od broja čvorova i komande. Komanda pravljenja EO pokazuje relativno skroman porast, i kao što je ranije primećeno nije pod uticajem broja čvorova. Druge dve komande pokazuju porast sa strmijim nagibom kako se broj čvorova povećava, što ukazuje na povećane troškove skaliranja pri većem broju čvorova. Kada se ovo uporedi sa grafikonom koji prikazuje isti eksperiment izvršen nad punom implementacijom prototipa (videti Sliku 6.10), primećuje se da se isti obrazac ponavlja bez značajnih odstupanja.



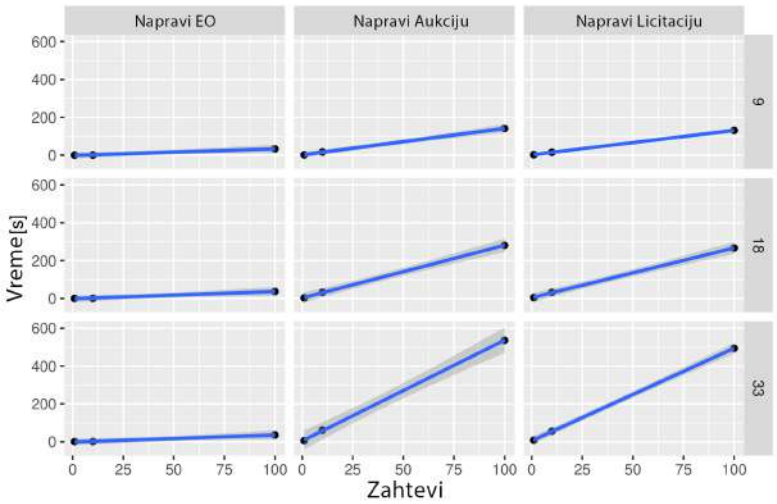
Slika 6.8: Vreme u odnosu na broj čvorova uz promenu broja zahteva i tip komande (potpuna implementacija) [49]



Slika 6.9: Vreme u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i tip komande (nepotpuna implementacija) [49]

Analiza memorije

Količina memorije korišćene u eksperimentu meri se u bajtovima, ali će biti prikazana u megabajtima radi lakše interpretacije. Važno je napomenuti da se ovde koristi

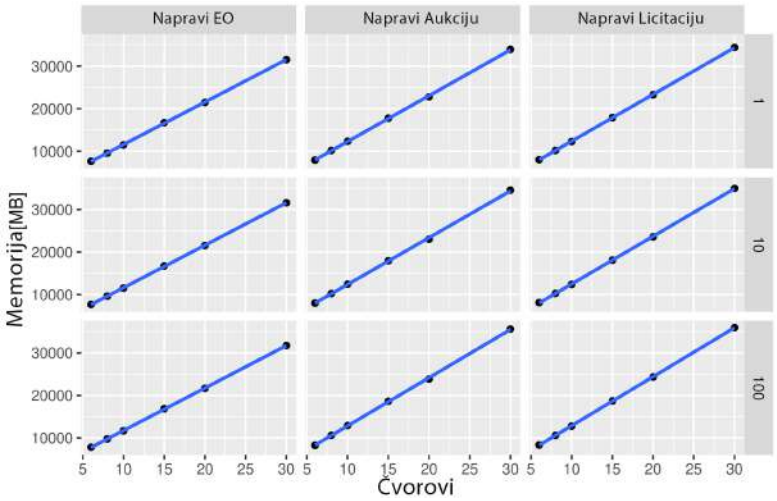


Slika 6.10: Vreme u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i tip komande (potpuna implementacija) [49]

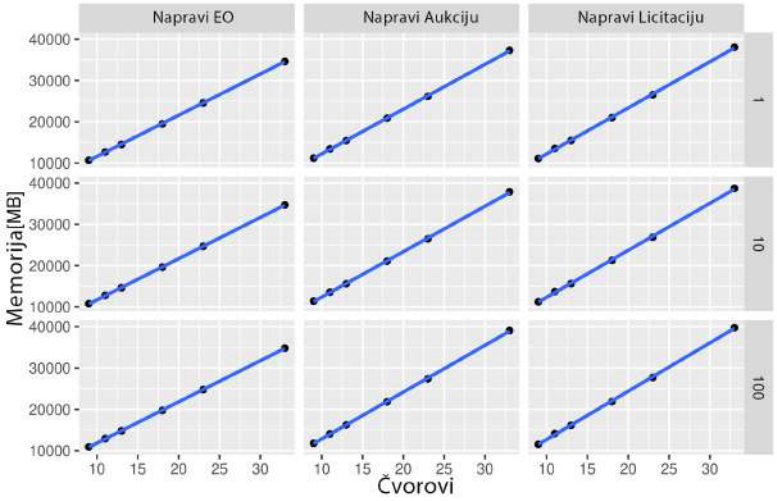
megabajt kao 10^6 bajtova, a ne mebibajt (2^{20} bajtova). Za potrebe ove analize, korišćenje memorije zasnovano je na onome što Linux prijavljuje kao RSS (engl. resident set size) procesa. Prirodno, to znači da rezultati nisu potpuno precizni, ali bi trebalo da budu dovoljno korelisani sa stvarnom upotrebom memorije za svrhe poređenja.

Prvi grafikon (videti Sliku 6.11) koji treba razmotriti prikazuje promenu upotrebe memorije u zavisnosti od broja čvorova uz promenu izvršene komande i broja zahteva. Kao i u slučaju analize vremena, ovaj grafikon omogućava istovremenu analizu relativne potrošnje memorije za različite komande, kao i kako to utiče na broj obrađenih zahteva i broj čvorova. Za razliku od analize vremena, ne očekuje se nužno linearan odnos, jer je razumno pretpostaviti da potrošnja memorije za obradu jednog zahteva nije znatno drugačija od, na primer, obrade deset zahteva, pod pretpostavkom razumno optimizovanog izvršavanja.

Rezultati analize memorije su potpuno jasni: upotreba memorije u potpunosti zavisi od broja pokrenutih čvorova. Gotovo ništa drugo nema značajan uticaj. Ovo ukazuje na to da memorijski otisak, nakon pokretanja infrastrukture, nije visok. Broj zahteva nema vidljiv uticaj, a izvršena komanda ima veoma ograničen efekat. Isti zaključci se mogu izvesti i pri korišćenju potpune implementacije prototipa. Potpuna implementacija uključuje znatno kompleksniju logiku, ali se i dalje prikazuju identični obrasci upotrebe memorije (videti Sliku 6.12).

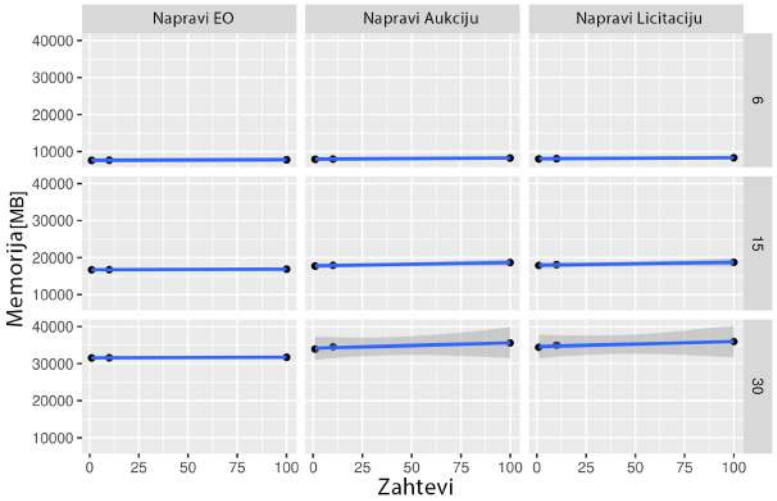


Slika 6.11: Upotreba memorije u odnosu na broj čvorova i zahteva (nepotpuna implementacija) [49]



Slika 6.12: Upotreba memorije u odnosu na broj čvorova i zahteva (potpuna implementacija) [49]

Kao i kod analize vremena, analiza broja zahteva je važna. Broj čvorova odabran je tako da formira tri grupe koje predstavljaju mali, srednji i veliki broj čvorova, a grafikon prikazuje upotrebu memorije u zavisnosti od broja zahteva (videti Sliku

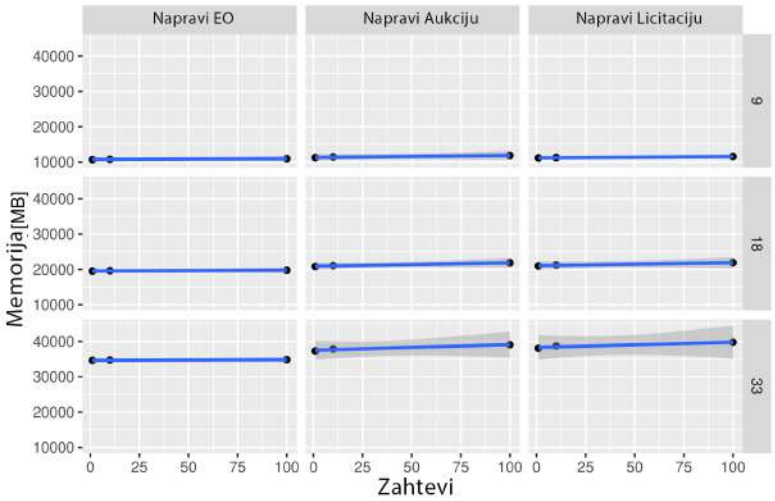


Slika 6.13: Upotreba memorije u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i zahteva (nepotpuna implementacija) [49]

6.13). Kao što se jasno vidi, upotreba memorije ne pokazuje značajnu interakciju sa brojem obrađenih zahteva. Na ovim skalama nije vidljiv nepovoljan uticaj povezan sa obradom velike količine podataka, broj čvorova ostaje jedini dominantan faktor. Isti obrazac vidljiv je i kod eksperimenata koji koriste potpunu implementaciju prototipa (videti Sliku 6.14).

Analiza karbonskog otiska

Pre nego što započnemo analizu karbonskog otiska, potrebno je postaviti glavne pretpostavke koje se koriste prilikom izračunavanja karbonskog otiska dobijenog pri proizvodnji energije korišćene u eksperimentima. Karbonski otisak za određenu količinu električne energije može značajno varirati. Procena korišćena u disertaciji je zasnovana na godišnjim izveštajima o proizvodnji električne energije kompanije Ember za 2023. godinu. [128] i 2022. [129] godinu, kao i na statističkom izveštaju Instituta za energetiku iz 2023. godine [130]. Ovi skupovi podataka pružaju informacije o intenzitetu emisije ugljen-dioksida u gramima CO_2 po kilovat-satu proizvedene energije u velikim zemljama. Korišten je prosečan intenzitet emisije ugljen-dioksida zemalja u okolini Srbije (klaster računara se nalazi u Srbiji, na Fakultetu Tehničkih Nauka u Novom Sad). Dobijene brojke predstavljaju pojednostavljenje realnog stanja, jer se intenzitet emisije CO_2 može razlikovati unutar jedne zemlje, a intenzitet emisije nije jedini faktor koji određuje karbonski otisak električne energije. Međutim, pojednostavljenje se može smatrati razumnim za potrebe ove analize kako dobijene



Slika 6.14: Upotreba memorije u odnosu na broj zahteva uz promenu broja čvorova i zahteva (potpuna implementacija) [49]

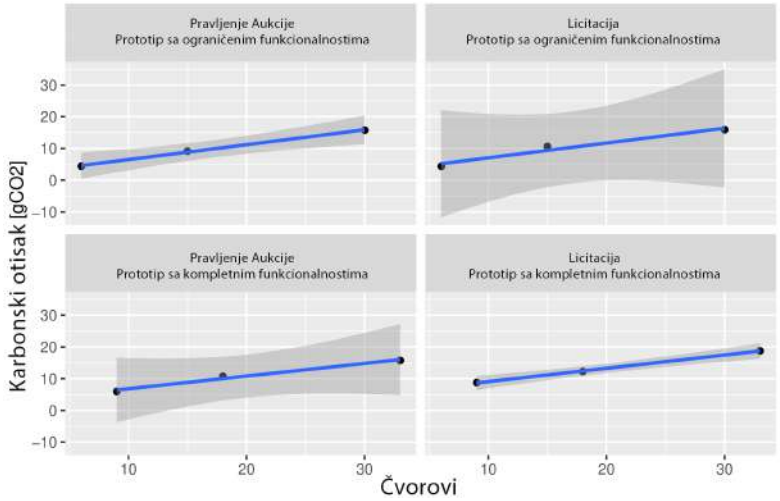
brojke imaju za cilj uviđanje opštih tendencija proizvodnje CO_2 gasa, a ne određivanje tačnih vrednosti.

Vrednost koja je korišćena je prosek za sve zemlje u citiranim skupovima podataka za 2022. godinu. Prosečan intenzitet emisije električne energije za zemlje u kojima se nalazi klaster iznosi 365,3805708 $\frac{gCO_2}{kWh}$ što je ekvivalentno 0,1014946 $\frac{gCO_2}{kJ}$ - izvedena vrednost je korišćena za izračunavanje karbonskog otiska u svim narednim analizama.

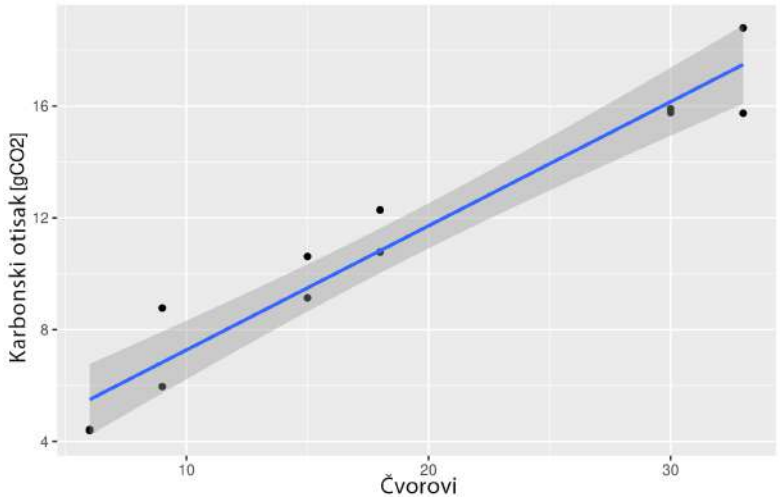
Analiza karbonskog otiska izvedena je na podskupu podataka, jer nisu svi eksperimenti uključivali merenje potrošnje energije. S obzirom na manji skup podataka, nije praktično prikazivati podatke na način koji je do sada korišćen, niti deskriptivne statistike imaju veliku vrednost. Podaci prikupljeni merenjem potrošnje energije prikazani su u Tabeli 6.5.

Dominantni faktor karbonskog otiska je broj čvorova, što se jasno može uočiti iz Tabele 6.5. Ovaj odnos se vizualno može videti i kada se karbonski otisak prikaže u odnosu na broj čvorova za sve komande, kao što je prikazano na Slici 6.15. Prikazani na jedinstvenom grafikonu, isti podaci su prikazani na Slici 6.16. Može se videti da, čak i kada se kombinuju svi podaci za sve komande i proširenih i neproširenih eksperimenata, karbonski otisak je u potpunosti dominiran brojem čvorova. Izvršena komanda i tip eksperimenta imaju predvidiv linearan efekat, ali je on zanemariv u odnosu na uticaj broja čvorova.

Jedan od načina da se rezultati analize karbonskog otiska stave u perspektivu jeste procena karbonskog otiska po transakciji i njegovo poređenje sa tipičnom tehnologijom



Slika 6.15: Karbonski otisak u odnosu na broj čvorova [49]



Slika 6.16: Karbonski otisak u odnosu na broj čvorova za sve tipove zahteva i eksperimente [49]

korišćenom u sličnim rešenjima. Kao tačka poređenja odabran je Itirijum blokčejn, fokusirajući se na njegovu PoS varijantu, s obzirom na to da je daleko energetski efikasnija i modernija iteracija od PoW varijante. Poredi se najintenzivniji eksperimentalni slučaj u izvršenim testovima (0.1869132 grama CO_2) sa karbonskim otiskom jedne Itir-

ijum transakcije. Potrošnja Itirijuma je preuzeta iz literature, konkretno iz rada [110]. Transakcija za mintovanje NFT-a je odabrana kao primer transakcije za poređenje. Izvršavanje ove transakcije zahteva razumnu, ali ne i preterano zahtevnu količinu posla na mreži, pri čemu je greška u proceni napravljena u korist Itirijuma kako bi poređenje bilo maksimalno pravedno. Prema dostupnim podacima, mintovanje NFT-a proizvodi 0,02 kg CO_2 gasa po transakciji. Što znači da implementirani prototip softverskog sistema za podršku trgovanju energijom troši približno 106 puta manje energije po transakciji u odnosu na slične transakcije na Itirijum mreži (Jednačina 6.1).

$$\frac{0,02\,\mathrm{kgCO_2}}{0,0001869132\,\mathrm{kgCO_2}} \approx 106 \tag{6.1}$$

Rezultati pokazuju da se korišćenjem predložene arhitekture implementirane upotrebom DLT tehnologije poput Korde može ostvariti značajna ušteda u karbonskom otisku. Ovo bi trebalo da podstakne buduće istraživače i softverske inženjere da testiraju alternativne tehnologije prilikom dizajniranja svojih aplikacija.

Rezime eksperimentalnih rezultata

Rezultati analize mogu se sažeti sledećim glavnim zaključcima:

- Vreme izvršavanja skalira se linearno s brojem obrađenih zahteva. Intenzitet ovog rasta zavisi od komande koja se izvršava i broja korišćenih čvorova. Pri izvođenju eksperimenata na Beovulf klasteru računara gubi se anomalija merenja vremena na jednom računaru pri pravljenja EO (vreme zahteva skalira linearno sa broj čvorova kod svih tipova zahteva).
- Broj čvorova u većini slučajeva ne povećava vreme izvršavanja. Međutim, povećanje je vidljivo u slučaju velikog broja čvorova koji izvršavaju komandu koja nije kreiranje energetskog obećanja.
- Upotreba memorije u potpunosti zavisi od broja korišćenih čvorova. Povećanje broja čvorova direktno vodi ka povećanju memorije. Broj obrađenih zahteva nema značajan uticaj na potrošnju memorije.
- Potpuna implementacija prototipa sistema uvodi nove funkcije i tipove čvorova u odnosu na nepotpunu implementaciju bez ikakvog primetnog pogoršanja performansi. Ovo ukazuje na to da aplikacija dobro se skalira kada je reč o vertikalnim unapređenjima funkcionalnosti.
- Karbonski otisak, na osnovu dostupnih podataka, snažno zavisi od broja korišćenih čvorova, pri čemu veći broj čvorova dovodi do većih emisija. Izvršena komanda ima ograničen uticaj na karbonski otisak.
- Karbonski otisak za eksperiment sa najintenzivnijim emisijama iznosi 0,1879132 gCO_2 po transakciji. To je približno 106 puta manje štetnog CO_2 zagađenja u odnosu na prosečnu sličnu Itirijum transakciju korištenu u najpopularnijim

softverskim rešenjima za distribuiranu trgovinu električnom energijom.

Predstavljene analize pokazuju da vreme utrošeno za izvršavanje transakcija ima linearne tendencije, dok potrošnja memorije potpuno zavisi od broja čvorova. Bitno je naglasiti da je prototip sistema implementiran tako da svi članovi mreže takođe budu i učesnici u transakcijama kao što su pravljenje aukcija i licitacije. To znači da u najgorem slučaju vreme izvršavanja transakcija linearno raste sa porastom broja čvorova. Očekivano je da sistem ima značajno bolje performanse u slučaju kada se primene neke od opisanih tehnika za smanjenje broja posmatrača u transakcijama koje nisu uopšte bile korišćene pri implementaciji prototipa.

Rezultati takođe pokazuju da je potrošnja energije cele distribuirane aplikacije znatno manja u poređenju sa sličnim aplikacijama koje koriste popularne tehnologije poput Itirijuma. Dobijeni rezultati imaju potencijal da utiču na industriju, tako što daju osnov softverskim arhitektama da razmotre korišćenje alternativnih DLT tehnologija poput Korde, umesto da se podrazumevano oslanjaju na popularna rešenja zasnovana na Itirijumu. Ovo je naročito relevantno u situacijama gde je umerena potrošnja resursa veći prioritet od povećane sigurnosti i redundanse podataka.

Poglavlje 7

Zaključak

Istraživanje predstavljeno u ovoj doktorskoj disertaciji predlaže softverski sistem za trgovanje električnom energijom koja je pretežno proizvedena iz obnovljivih izvora. Ključni elementi arhitekture predloženog sistema se zasnivaju na DLT tehnologiji. Upotrebom ove tehnologije vrši se decentralizacija tradicionalno centralizovanih sistema za trgovanje energijom. Decentralizacijom se sistemi za trgovanje takođe prilagođavaju novonastalim izmenama u elektroenergetskim mrežama u kojima su prozjumeri sve češći učesnici i ne postoji više potreba za centralizovanim sistemom za trgovanje energijom.

Arhitektura obuhvata postojeće učesnike u mrežama kao što su prozjumeri, elektroprivreda, proizvođači i korisnici, ali takođe i predlaže nove učesnike poput mrežnog nadzornog tela, verifikacionih agencija i skladišta energije. Komunikacioni model između učesnika je osmišljen tako da samo neophodni članovi transakcija učestvuju u njima i transakcije se ne čuvaju u jednom velikom lancu blokova kao što je to slučaj kod najvećeg broja sličnih rešenja pronađenih u literaturi. Svaka grupa učesnika formira zaseban lanac kriptografski povezanih objekata čime se smanjuje redundansa podataka i ostvaruje nivo privatnosti uz očuvanje svih bezbednosnih prednosti koje nude blokčejn sistemi. Upotrebom predloženih funkcionalnosti poput verifikacije izvora energije i skladištenja energije koje se oslanja na tržišne mehanizme, podstiču se mali proizvođači energije da budu aktivni učesnici elektroenergetskih mreža. Sistem takođe predlaže i mehanizme koji ograničavaju negativne uticaje malih proizvođača na stabilnost mreže.

Arhitektura za podršku trgovanju je osmišljena tako da za njenu upotrebu nije neophodno menjati elektroenergetsku mrežu. Cilj istraživanja je bio uvesti decentralizaciju trgovanja i povećati bezbednost sistema uz upotrebu postojećih elektroenergetskih mreža. Bitno je naglasiti da se sistem oslanja na postojanje pametnih strujomera koji su generalno u sve većoj upotrebi u svetu i nezavisno od upotrebe predloženog sistema se očekuje njihova povećana upotreba u svetu.

U istraživanju je takođe predstavljena metodologija za testiranje performansi predloženog sistema. Metodologija ima za cilj da na generički način izmeri performanse implementiranog prototipa predloženog sistema sa fokusom na merenje: vremena izvršavanja transakcija, potrošnje računarskih resursa i potrošnje električne energije.

Metodologija predlaže generičko rešenje koje se lako može proširiti na merenje performansi drugih DLT i blokčejn sistema koji nisu korišćeni za istu svrhu. Obuhvatanje potrošnje električne energije je ključni deo metodologije koje stavlja fokus na praktičnu upotrebljivost sistema i dugotrajnu isplativost korišćenja kompleksnih softverskih rešenja. Neretko u praksi kompleksnost softverskog sistema utiče na to da njegova upotreba iziskuje mnogo resursa čija potrošnja nije opravdana prednostima koje sistem donosi. Primarni cilj predložene metodologije je da takve slučajeve detektuje.

Istraživanje prezentuje i rezultate eksperimentalne evaluacije performansi prototipa implementiranog na osnovu predložene arhitekture sistema za trgovanje. Izvršen je niz eksperimenata prema predloženoj metodologiji. Rezultati ukazuju na to da sistem pretežno dobro skalira kada su u pitanju većina ključnih performansi uz izraženo malu potrošnju energije u poređenju sa sličnim sistemima koji su implementirani uz upotrebu Itirijum tehnologije. Itirijum je u literaturi dominantna tehnologija koja se koristi za implementaciju sličnih sistema i rezultati pokazuju da upotreba alternativnih tehnologija može pružiti izuzetno dobre rezultate. Bitno je naglasiti da su rezultati dobijeni upotrebom Korda tehnologije za implementaciju rešenja, ali da tehnologija nije ključni izvor dobrih performansi. Glavni doprinos performansama dolazi iz alternativne arhitekture sistema koju nije moguće implementirati upotrebom popularnih tehnologija poput Itirijuma. Predviđa se da bi upotreba neke druge tehnologije koja pruža mogućnost upotrebe opisane arhitekture dala bolje rezultate. Srž Korda tehnologije koristi Java virtuelnu mašinu za pokretanje svojih čvorova koja u praksi nije poznata kao visoko performantna.

Najznačajniji opšti rezultati ovog istraživanja obuhvataju sledeće:

- Predlog sistema sa distribuiranom glavnom knjigom za trgovanje energijom pretežno dobijenom iz obnovljivih izvora. Sistem omogućava trgovanje energijom bez centralizovanog autoriteta uz povećanu bezbednost softverskog sistema i predlaganje mehanizama koji pomažu u očuvanju stabilnosti elektroenergetske mreže.
- Predlog metodologije za testiranje performansi opisanog sistema uz generalizacije koje ga čine upotrebljivim za testiranje proizvoljnog DLT sistema. Metodologija se fokusira na testiranje praktične upotrebe, štetnih emisija i dugotrajne isplativosti softverskog sistema.
- Implementacija predložene metodologije i eksperimentalni rezultati koji empirijski potvrđuju benefite predložene arhitekture. Rezultati pokazuju da predložena arhitektura koristi i do sto puta manje energije po transakciji u odnosu na rešenja najčešće pominjana u literaturi.

Budući pravci istraživanja obuhvataju praktično testiranje upotrebljivosti arhitekture u realnom elektroenergetskom sistemu kao i inkrementalan rad na unapređivanju predložene arhitekture. Konkretni koraci obuhvataju:

- Optimizacija linearnih karakteristika performansi sistema koje se javljaju sa povećanjem broja čvorova. Ovaj problem je moguće rešiti uz pravljenje ad hoc grupa ušesnika i dodatno ograničavanje broja učesnika transakcija. Jedan od načina formiranja grupa bi bila potražnja korisnika za električnom energijom. U slučaju da korisnici nisu aktivno u potrazi za električnom energijom, nema potrebe obaveštavati ih o događajima na mreži poput formiranja nove aukcije, pravljenja novog energetskog obećanja itd. Time bi se u velikoj meri smanjio broj članova koji učestvuju u transakcijama i poboljšale potencijalno problematične performanse sistema koje pokazuju linearni rast sa povećanjem broja učesnika mreže. Ovim potezom bi se prirodno izdvajale grupe članova koji u određenom momentu učestvuju u određenim transakcijama i time generalno povećali kapacitet softverskog sistema da dobro skalira i u slučajevima kada postoji veliki broj čvorova u mreži. Predloženo formiranje grupa korisnika bi dodatno smanjilo komunikaciju u mreži i povećalo performanse. Međutim, potrebno je izvršiti detaljnija testiranja kako bi se pokazala istinitost ove hipoteze.
- Opisani eksperimenti su izvršeni u distribuiranom okruženju, ali uz upotrebu simulirane elektroenergetske mreže. Naredni prirodni korak u istraživanju je testiranje sistema nad realnom mikromrežom i prikupljanje povratnih informacija o njegovom radu u stvarnom svetu.
- Automatizacija trgovanja električnom energijom uz upotrebu predloženog sistema. Prototip sistema predviđa kupovanje energiju od strane korisnika. Ovaj proces zahteva razumevanje sistema i pažnju koja može biti prepreka za upotrebu sistema od strane širih grupa korisnika. Stoga bi automatizacija procesa trgovanja i pružanje optimizovanih strategija koje korisnici mogu primeniti uz nekoliko klikova bili neophodni za globalno prihvatanje sistema.
- Inkrementalna optimizacija arhitekture sistema bi se vršila uz oslanjanje na povratne informacije prikupljene od korisnika i uz prikupljanje metrika sistema u aktivnoj upotrebi.

Literatura

[1] S. S. Refaat, O. Ellabban, S. Bayhan, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, and M. M. Begovic, *Smart Grid and Enabling Technologies*. John Wiley & Sons, Aug. 2021. Google-Books-ID: e104EAAAQBAJ.

[2] D. B. Gajić, V. B. Petrović, N. Horvat, D. Dragan, A. Stanisavljević, and V. Katić, "Blockchain-based Smart Decentralized Energy Trading for Grids with Renewable Energy Systems," in *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, pp. 1–7, Oct. 2021.

[3] Y. Cai, T. Huang, E. Bompard, Y. Cao, and Y. Li, "Self-sustainable community of electricity prosumers in the emerging distribution system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2207–2216, 2016.

[4] D. Infield and L. Freris, *Renewable energy in power systems*. John Wiley & Sons, 2020.

[5] E. T. Efaz, M. M. Rhaman, S. Al Imam, K. L. Bashar, F. Kabir, M. E. Mourtaza, S. N. Sakib, and Mozahid, "A review of primary technologies of thin-film solar cells," *Engineering Research Express*, vol. 3, no. 3, p. 032001, 2021.

[6] R. Jones-Albertus, W. Cole, P. Denholm, D. Feldman, M. Woodhouse, and R. Margolis, "Solar on the rise: How cost declines and grid integration shape solar's growth potential in the united states," *MRS Energy Sustainability*, vol. 5, p. E4, 2018.

[7] M. Taylor, P. Ralon, H. Anuta, and S. Al-Zoghoul, "Irena renewable power generation costs in 2022," *International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, UAE*, 2020.

[8] D. S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of power system economics*. John Wiley & Sons, 2018.

[9] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, *Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management*. John Wiley & Sons, 2002.

[10] S. Stoft, "Power system economics," *Journal of Energy Literature*, vol. 8, pp. 94–99, 2002.

[11] Blockchair, "Universal blockchain explorer and search engine." . [Online]. Dostupno na: https://blockchair.com/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[12] A. S. Tanenbaum and M. Van Steen, *Distributed systems*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.

[13] M. T. Özsu, P. Valduriez, *et al.*, *Principles of distributed database systems*, vol. 2. Springer, 1999.

[14] S. Tarkoma, *Overlay Networks: Toward Information Networking*. Auerbach Publications, 2010.

[15] E. K. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma, and S. Lim, "A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 7, no. 2, pp. 72–93, 2005.

[16] J. F. Buford and H. Yu, "Peer-to-peer networking and applications: synopsis and research directions," *Handbook of peer-to-peer networking*, pp. 3–45, 2009.

[17] K. Aberer, L. O. Alima, A. Ghodsi, S. Girdzijauskas, S. Haridi, and M. Hauswirth, "The essence of p2p: A reference architecture for overlay networks," in *Fifth IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'05)*, pp. 11–20, IEEE, 2005.

[18] S. Androutsellis-Theotokis and D. Spinellis, "A survey of peer-to-peer content distribution technologies," *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 36, no. 4, pp. 335–371, 2004.

[19] J. Buford, H. Yu, and E. K. Lua, *P2P networking and applications*. Morgan Kaufmann, 2009.

[20] Q. H. Vu, M. Lupu, and B. C. Ooi, *Peer-to-peer computing: Principles and applications*, vol. 1. Springer, 2010.

[21] H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, D. Karger, R. Morris, and I. Stoica, "Looking up data in p2p systems," *Communications of the ACM*, vol. 46, no. 2, pp. 43–48, 2003.

[22] T. M. Risson John, "Survey of research towards robust peer-to-peer networks: Search methods," *Computer Networking*, vol. 50, no. 17, pp. 3485–3521, 2006.

[23] C. Gkantsidis, M. Mihail, and A. Saberi, "Random walks in peer-to-peer networks," in *IEEE INFOCOM 2004*, vol. 1, IEEE, 2004.

[24] Q. Lv, P. Cao, E. Cohen, K. Li, and S. Shenker, "Search and replication in unstructured peer-to-peer networks," in *Proceedings of the 16th international conference on Supercomputing*, pp. 84–95, 2002.

[25] B. B. Yang and H. Garcia-Molina, "Designing a super-peer network," in *Proceedings 19th international conference on data engineering (Cat. No. 03CH37405)*, pp. 49–60, IEEE, 2003.

[26] P. Garbacki, D. H. Epema, and M. van Steen, "The design and evaluation of a self-organizing superpeer network," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 59, no. 3, pp. 317–331, 2009.

[27] B. Cohen, "Incentives build robustness in bittorrent," in *Workshop on Economics of Peer-to-Peer systems*, vol. 6, pp. 68–72, Berkeley, CA, USA, 2003.

[28] N. Szabo, "Formalizing and securing relationships on public networks," *First monday*, 1997.

[29] J. A. Fairfield, "Smart contracts, bitcoin bots, and consumer protection," *Wash. & Lee L. Rev. Online*, vol. 71, p. 35, 2014.

[30] V. Buterin, "A next-generation smart contract and decentralized application platform." . [Online]. Dostupno na: https://ethereum.org/en/whitepaper/. Poslednji pristup: Februar. 2, 2024.

[31] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," *Decentralized Business Review*, p. 21260, 2008.

[32] G. Hileman and M. Rauchs, "2017 Global Blockchain Benchmarking Study," *SSRN Electronic Journal*, 2017.

[33] M. J. M. Chowdhury, M. S. Ferdous, K. Biswas, N. Chowdhury, A. S. M. Kayes, M. Alazab, and P. Watters, "A Comparative Analysis of Distributed Ledger Technology Platforms," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167930–167943, 2019. Conference Name: IEEE Access.

[34] M. Gorbunova, P. Masek, M. Komarov, and A. Ometov, "Distributed ledger technology: State-of-the-art and current challenges," *Computer Science and Information Systems*, no. 00, pp. 37–37, 2021.

[35] D. Gajić and D. Dragan, "Blockchain for business: Technology and applications," in *Proceedings of the International Conference on. Applied Internet and Information Technologies—ICAIIT, Zrenjanin, Serbia*, pp. 3–4, 2019.

[36] R3, "Corda Platform." . [Online]. Dostupno na: https://docs.r3.com/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[37] Hyperledger, "Open Source Blockchain Technologies." . [Online]. Dostupno na: https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[38] T. Swanson, "Consensus-as-a-service: a brief report on the emergence of permissioned, distributed ledger systems," *Report, available online*, vol. 28, 2015.

[39] L. Lamport, "Generalized consensus and paxos," *Report*, 2005. . [Online]. Dostupno na: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/tr-2005-33.pdf Poslednji pristup: Februar. 28, 2025.

[40] D. Ongaro and J. Ousterhout, "In search of an understandable consensus algorithm," in *2014 USENIX annual technical conference (USENIX ATC 14)*, pp. 305–319, 2014.

[41] M. Castro, B. Liskov, *et al.*, "Practical byzantine fault tolerance," in *OsDI*, vol. 99, pp. 173–186, 1999.

[42] E. Foundation, "Ethereum consensus attacks." . [Online]. Dostupno na: https://blog.ethereum.org/2016/12/07/history-casper-chapter-2. Poslednji pristup: Septembar 2, 2025.

[43] D. Mohanty, *R3 Corda for architects and developers: With case studies in finance, insurance, healthcare, travel, telecom, and agriculture*. Apress, 2019.

[44] U. W. Chohan, "The double spending problem and cryptocurrencies," *Available at SSRN 3090174*, 2021.

[45] M. Wohrer and U. Zdun, "Smart contracts: security patterns in the ethereum ecosystem and solidity," in *2018 International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering (IWBOSE)*, pp. 2–8, IEEE, 2018.

[46] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, and A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143–174, Feb. 2019.

[47] N. Khezami, N. Gharbi, B. Neji, and N. B. Braiek, "Blockchain technology implementation in the energy sector: Comprehensive literature review and mapping," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, 2022.

[48] T. Al-Abri, A. Onen, R. Al-Abri, A. Hossen, A. Al-Hinai, J. Jung, and T. S. Ustun, "Review on energy application using blockchain technology with an introductions in the pricing infrastructure," *IEEE Access*, 2022.

[49] N. Horvat, D. B. Gajić, P. Trifunović, V. B. Petrović, D. Dragan, and V. A. Katić, "Performance evaluation of a distributed ledger-based platform for renewable energy trading," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86013–86033, 2024.

[50] M. Schäffer, M. Di Angelo, and G. Salzer, "Performance and scalability of private ethereum blockchains," in *Business Process Management: Blockchain and Central and Eastern Europe Forum: BPM 2019 Blockchain and CEE Forum, Vienna, Austria, September 1–6, 2019, Proceedings 17*, pp. 103–118, Springer, 2019.

[51] E. Org, "Ethereum Energy Consumption." . [Online]. Dostupno na: https://ethereum.org/en/energy-consumption/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[52] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, and C. Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 870–880, Jan. 2018.

[53] L. Lamport, R. Shostak, and M. Pease, "The Byzantine generals problem," in *Concurrency: the Works of Leslie Lamport*, pp. 203–226, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Oct. 2019.

[54] R. K. Kodali, S. Yerroju, and B. Y. K. Yogi, "Blockchain Based Energy Trading," in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1778–1783, Oct. 2018. ISSN: 2159-3450.

[55] S. Wang, A. F. Taha, J. Wang, K. Kvaternik, and A. Hahn, "Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, pp. 1612–1623, Aug. 2019. Conference Name: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems.

[56] Z. Li, J. Kang, R. Yu, D. Ye, Q. Deng, and Y. Zhang, "Consortium Blockchain for Secure Energy Trading in Industrial Internet of Things," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, pp. 3690–3700, Aug. 2018. Conference Name: IEEE Transactions on Industrial Informatics.

[57] S. J. Pee, E. S. Kang, J. G. Song, and J. W. Jang, "Blockchain based smart energy trading platform using smart contract," in *2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC)*, pp. 322–325, Feb. 2019.

[58] N. Wang, X. Zhou, X. Lu, Z. Guan, L. Wu, X. Du, and M. Guizani, "When Energy Trading Meets Blockchain in Electrical Power System: The State of the Art," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 1561, Jan. 2019. Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

[59] S. Seven, G. Yao, A. Soran, A. Onen, and S. M. Muyeen, "Peer-to-Peer Energy Trading in Virtual Power Plant Based on Blockchain Smart Contracts," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175713–175726, 2020. Conference Name: IEEE Access.

[60] G. Electric, "The digital power plant," . [Online]. Dostupno na: https://www.ge.com/digital/. Poslednji pristup: Novembar. 12, 2023.

[61] M. R. Hamouda, M. E. Nassar, and M. Salama, "A novel energy trading framework using adapted blockchain technology," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2165–2175, 2020.

[62] E. K. Markakis, Y. Nikoloudakis, K. Lapidaki, K. Fiorentzis, and E. Karapidakis, "Unification of edge energy grids for empowering small energy producers," *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8487, 2021.

[63] C. Shah, J. King, and R. W. Wies, "Distributed admm using private blockchain for power flow optimization in distribution network with coupled and mixed-integer constraints," *IEEE access*, vol. 9, pp. 46560–46572, 2021.

[64] A. A. G. Agung and R. Handayani, "Blockchain for smart grid," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Jan. 2020.

[65] I. Kappos, I. Kouveliotis-Lysikatos, and N. Hatziargyriou, "A Blockchain Platform for the Decentralized Operation of Active Distribution Networks," in *2021 IEEE Madrid PowerTech*, pp. 1–6, June 2021.

[66] N. Karandikar, A. Chakravorty, and C. Rong, "Blockchain based transaction system with fungible and non-fungible tokens for a community-based energy infrastructure," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3822, 2021.

[67] A. Lucas, D. Geneiatakis, Y. Soupionis, I. Nai-Fovino, and E. Kotsakis, "Blockchain technology applied to energy demand response service tracking and data sharing," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 1881, 2021.

[68] B.-C. Neagu, O. Ivanov, G. Grigoras, and M. Gavrilas, "A new vision on the prosumers energy surplus trading considering smart peer-to-peer contracts," *Mathematics*, vol. 8, no. 2, p. 235, 2020.

[69] C. Zhang, J. Wu, Y. Zhou, M. Cheng, and C. Long, "Peer-to-peer energy trading in a microgrid," *Applied energy*, vol. 220, pp. 1–12, 2018.

[70] Q. Yang, H. Wang, T. Wang, S. Zhang, X. Wu, and H. Wang, "Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant," *Applied Energy*, vol. 294, p. 117026, 2021.

[71] J. Guo, X. Ding, and W. Wu, "An architecture for distributed energies trading in byzantine-based blockchains," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 1216–1230, 2022.

[72] J. Lu, S. Wu, H. Cheng, and Z. Xiang, "Smart contract for distributed energy trading in virtual power plants based on blockchain," *Computational Intelligence*, vol. 37, no. 3, pp. 1445–1455, 2021.

[73] M. H. Nazari and A. K. Biswas, "Decentralized p2p trading based on blockchain for retail electricity markets," in *2024 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1–5, IEEE, 2024.

[74] "Powerledger." [Online]. Dostupno na: https://www.powerledger.io/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[75] EU, "Wepower." . [Online]. Dostupno na: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/tool/dlt4good/we-power$_e$n. Poslednji pristup: Februar. 25, 2025.

[76] SunContract, "Energy trading platform." . [Online]. Dostupno na: https://suncontract.org/. Poslednji pristup: Februar. 28, 2025.

[77] Electron, "Energy trading platform." . [Online]. Dostupno na: https://electron.net/. Poslednji pristup: Februar. 28, 2025.

[78] C. Connors and D. Sarkar, "Comparative study of blockchain development platforms: features and applications," *arXiv preprint arXiv:2210.01913*, 2022.

[79] Etherscan, "Ethereum node tracker," 2025. . [Online]. Dostupno na: https: //etherscan.io/nodetracker Poslednji pristup: Septembar. 28, 2025.

[80] V. Buterin and V. Griffith, "Casper the friendly finality gadget," *arXiv preprint arXiv:1710.09437*, 2017.

[81] E. foundation, "Ethereum archive node," 2025. . [Online]. Dostupno na: https: //ethereum.org/developers/docs/nodes-and-clients/archive-nodes Poslednji pristup: Septembar. 28, 2025.

[82] X. B. Wu, Z. Zou, and D. Song, *Learn Ethereum: A practical guide to help developers set up and run decentralized applications with Ethereum 2.0.* Packt Publishing Ltd, 2023.

[83] M. Shafie-khah, *Blockchain-Based Smart Grids.* Elsevier, June 2020. Google-Books-ID: f33gDwAAQBAJ.

[84] L. Toderean, C. Antal, M. Antal, D. Mitrea, T. Cioara, I. Anghel, and I. Salomie, "A lockable erc20 token for peer to peer energy trading," in *2021 IEEE 17th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pp. 145–151, IEEE, 2021.

[85] S. Saxena, H. Farag, A. Brookson, H. Turesson, and H. Kim, "Design and field implementation of blockchain based renewable energy trading in residential communities," in *2019 2nd international conference on smart grid and renewable energy (SGRE)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.

[86] Y. Bakos and H. Halaburda, "Permissioned vs permissionless blockchain platforms: tradeoffs in trust and performance," *NYU Stern School of Business working paper*, 2021.

[87] CoinMarketCap, "Blockchain Trilemma Definition." . [Online]. Dostupno na: https://coinmarketcap.com/academy/glossary/blockchain-trilemma. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[88] E. Org, "The Merge." . [Online]. Dostupno na: https://ethereum.org/en/roadmap/merge/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[89] "What Is Sharding?." . [Online]. Dostupno na: https://crypto.com/university/what-is-sharding. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[90] Chainlink, "What Is Layer 2?." . [Online]. Dostupno na: https://chain.link/education-hub/what-is-layer-2. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[91] M. Dabbagh, M. Kakavand, M. Tahir, and A. Amphawan, "Performance analysis of blockchain platforms: Empirical evaluation of hyperledger fabric and ethereum," in *2020 IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)*, pp. 1–6, 2020.

[92] H. Foundation, "Benchmarking Hyperledger Fabric 2.5 Performance." . [Online]. Dostupno na: https://www.hyperledger.org/blog/2023/02/16/benchmarking-hyperledger-fabric-2-5-performance. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[93] R. Corda, "Performance benchmarking results of Corda 4.8." . [Online]. Dostupno na: https://docs.r3.com/en/platform/corda/4.8/enterprise/performance-testing/performance-results.html. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[94] R. Corda, "Transactions Per Second (TPS)." . [Online]. Dostupno na: https://corda.net/blog/transactions-per-second-tps/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[95] S. Shalaby, A. A. Abdellatif, A. Al-Ali, A. Mohamed, A. Erbad, and M. Guizani, "Performance evaluation of hyperledger fabric," in *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*, pp. 608–613, IEEE, 2020.

[96] J. Polge, J. Robert, and Y. Le Traon, "Permissioned blockchain frameworks in the industry: A comparison," *ICT Express*, vol. 7, no. 2, pp. 229–233, 2021.

[97] R. Han, G. Shapiro, V. Gramoli, and X. Xu, "On the performance of distributed ledgers for internet of things," *Internet of Things*, vol. 10, p. 100087, 2020. Special Issue of the Elsevier IoT Journal on Blockchain Applications in IoT Environments.

[98] A. A. Monrat, O. Schelén, and K. Andersson, "Performance evaluation of permissioned blockchain platforms," in *2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)*, pp. 1–8, 2020.

[99] S. Pongnumkul, C. Siripanpornchana, and S. Thajchayapong, "Performance analysis of private blockchain platforms in varying workloads," in *2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pp. 1–6, 2017.

[100] M. Touloupou, M. Themistocleous, E. Iosif, and K. Christodoulou, "A systematic literature review toward a blockchain benchmarking framework," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70630–70644, 2022.

[101] T. T. A. Dinh, J. Wang, G. Chen, R. Liu, B. C. Ooi, and K.-L. Tan, "Blockbench: A framework for analyzing private blockchains," in *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data*, SIGMOD '17, (New York, NY, USA), p. 1085–1100, Association for Computing Machinery, 2017.

[102] D. Saingre, T. Ledoux, and J.-M. Menaud, "Bctmark: a framework for benchmarking blockchain technologies," in *2020 IEEE/ACS 17th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pp. 1–8, 2020.

[103] H. Organization, "Caliper is a blockchain performance benchmark framework, which allows users to test different blockchain solutions with predefined use cases, and get a set of performance test results.." . [Online]. Dostupno na: https://hyperledger.github.io/caliper/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[104] "Metrics data and monitoring - Enterprise 4.8." . [Online]. Dostupno na: https://docs.r3.com/en/platform/corda/4.8/enterprise/operations/monitoring-logging/metrics-monitoring-scenarios.html. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[105] Apache, " Apache JMeter™." . [Online]. Dostupno na: https://jmeter.apache.org/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[106] J. Sedlmeir, H. U. Buhl, G. Fridgen, and R. Keller, "The energy consumption of blockchain technology: Beyond myth," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 62, pp. 599–608, Dec 2020.

[107] J. Sedlmeir, H. U. Buhl, G. Fridgen, and R. Keller, "Ein blick auf aktuelle entwicklungen bei blockchains und deren auswirkungen auf den energieverbrauch," *Informatik Spektrum*, vol. 43, pp. 391–404, nov 2020.

[108] A. O. Bada, A. Damianou, C. M. Angelopoulos, and V. Katos, "Towards a green blockchain: A review of consensus mechanisms and their energy consumption," in *2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 503–511, 2021.

[109] Digiconomist, "Bitcoin Energy Consumption Index." . [Online]. Dostupno na: https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[110] Z. Tian, "Post-merge carbon footprint analysis and sustainability in the nft art market," *Arts*, vol. 12, no. 5, 2023.

[111] R. Neiheiser, G. Inácio, L. Rech, C. Montez, M. Matos, and L. Rodrigues, "Practical limitations of ethereum's layer-2," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8651–8662, 2023.

[112] A. Gangwal, H. R. Gangavalli, and A. Thirupathi, "A survey of layer-two blockchain protocols," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 209, p. 103539, 2023.

[113] L. Donno, "Optimistic and validity rollups: Analysis and comparison between optimism and starknet," *arXiv preprint arXiv:2210.16610*, 2022.

[114] S. Chaliasos, I. Reif, A. Torralba-Agell, J. Ernstberger, A. Kattis, and B. Livshits, "Analyzing and benchmarking zk-rollups," in *6th Conference on Advances in Financial Technologies (AFT 2024)*, pp. 6–1, Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik, 2024.

[115] R. Corda, "Just How Energy Efficient is Your Blockchain?." . [Online]. Dostupno na: https://r3.com/blog/just-how-energy-efficient-is-your-blockchain/. Poslednji pristup: April 2, 2024.

[116] P. Richard, M. Schlösser, H. Zimmermann, V. Gramlich, F. Paetzold, and J. Strüker, "Rethinking blockchain's electricity consumption," 2023.

[117] S. Riaz, H. Marzooghi, G. Verbič, A. C. Chapman, and D. J. Hill, "Generic demand model considering the impact of prosumers for future grid scenario analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 819–829, 2017.

[118] T. Cloud, "Price of running blockchain nodes," 2025. . [Online]. Dostupno na: https://www.tencentcloud.com/document/product/1258/69041 Poslednji pristup: Septembar. 28, 2025.

[119] R. Corda, "Documentation (2024)." . [Online]. Dostupno na: https://docs.r3.com. Poslednji pristup: Februar. 25, 2024.

[120] I. R. Fund—Rannis, "Final draft of the technical report for the project no. 1910281-0611, alein payment system architecture design."

[121] A. K. Shin, "Hyperledger Fabric vs R3 Corda: A Business Perspective," June 2020.

[122] D. B. Gajić, V. B. Petrović, N. Horvat, D. Dragan, A. Stanisavljević, V. Katić, and J. Popović, "A distributed ledger-based automated marketplace for the decentralized trading of renewable energy in smart grids," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2121, 2022.

[123] C. Long, Y. Zhou, and J. Wu, "A game theoretic approach for peer to peer energy trading," *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 454–459, 2019.

[124] B. Boehm, B. Clark, E. Horowitz, C. Westland, R. Madachy, and R. Selby, "Cost models for future software life cycle processes: Cocomo 2.0," *Annals of software engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 57–94, 1995.

[125] A. A. Datti, H. A. Umar, and J. Galadanci, "A beowulf cluster for teaching and learning," *Procedia Computer Science*, vol. 70, pp. 62–68, 2015.

[126] C. Fan, S. Ghaemi, H. Khazaei, and P. Musilek, "Performance evaluation of blockchain systems: A systematic survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 126927–126950, 2020.

[127] "Chauvin arnoux c.a 8336 –Measurement instrument." . [Online]. Dostupno na: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/HLHBXUP5.PDF. Poslednji pristup: Oktobar. 6, 2023.

[128] Ember, "Yearly electricity data (2023)." . [Online]. Dostupno na: https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data. Poslednji pristup: Februar. 7, 2024.

[129] Ember, "Yearly electricity data (2022)." . [Online]. Dostupno na: https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2022/. Poslednji pristup: Februar. 7, 2024.

[130] E. Institute, "Statistical review of world energy (2023)." . [Online]. Dostupno na: https://www.energyinst.org/statistical-review. Poslednji pristup: Februar. 7, 2024.

Dodaci

Dodatak A

Tabele sa apsolutnim rezultatima

Tabele koje sadrže agregirane apsolutne rezultate grupe eksperimenta izvršene na jednom računaru i klasteru računara. U posebnim tabelama su prikazani apsolutni rezultati prve i druge grupe eksperimenata koji su izvršeni na računarskom klasteru. Iako je uložen trud da se rezultati maksimalno agregiraju radi prikaza, tabele su i dalje obimne i stoga prikazane u dodatku.

Tabela A.1: Rezultati merenja performansi na jednom računaru

Komanda	Broj transakcija u skupu	Potrošeno vreme (s)	Utrošen RAM (MB)	Broj proizvođača	Broj korisnika
Napravi EO	1	0.06585597992	6865.960938	1	1
Napravi EO	10	0.9306168556	6910.265625	1	1
Napravi EO	100	26.22153902	7022.179688	1	1
Napravi aukciju	1	0.7814075947	7190.484375	1	1
Napravi aukciju	10	6.66676569	7253.59375	1	1
Napravi aukciju	100	47.89252067	7494.378906	1	1
Licitacija	1	0.6825251579	7311.003906	1	1
Licitacija	10	6.211147547	7383.039063	1	1
Licitacija	100	50.31095862	7585.046875	1	1
Napravi EO	1	0.03037405014	9386.363281	2	2
Napravi EO	10	0.6607437134	9418.617188	2	2
Napravi EO	100	24.95331192	9509.34375	2	2
Napravi aukciju	1	1.274894476	9056.378906	2	2
Napravi aukciju	10	8.917809486	9332.40625	2	2
Napravi aukciju	100	63.44927835	9595.054688	2	2
Licitacija	1	0.9745314121	9737.679688	2	2
Licitacija	10	8.383556128	9812.226563	2	2
Licitacija	100	66.07321739	10060.07422	2	2
Napravi EO	1	0.05108809471	10964.48438	4	4
Napravi EO	10	0.9865925312	11012.79688	4	4
Napravi EO	100	24.94134283	11005.85156	4	4
Napravi aukciju	1	1.119453669	10999.73828	4	4
Napravi aukciju	10	11.25263548	11137.57813	4	4
Napravi aukciju	100	75.20034885	11466.33203	4	4
Licitacija	1	1.133110285	11149.22266	4	4
Licitacija	10	10.63492489	11174.68359	4	4
Licitacija	100	76.62068439	11494.77734	4	4

Tabela A.2: Usrednjeni rezultati potrošnje računarskih resursa za drugu grupu eksperimenata

Komanda	Broj poziva	Proteklo vreme (s)	Mem. Omega (MB)	Mem. Alfa (MB)	Mem. Beta (MB)	Mem. Gama (MB)	Prozjumer	Proizvođač	Korisnik
Napravi EO	1	0.4013826609	3200.838672	971.1371094	2032.673828	1078.166016	1	1	1
Napravi EO	10	0.971877074	3200.633594	971.5390625	2053.921094	1101.71875	1	1	1
Napravi EO	100	33.49131541	3243.737891	971.9472656	2110.087109	1127.001172	1	1	1
Napravi aukciju	1	1.270452452	3290.229297	1055.405078	2150.411719	1077.193359	1	1	1
Napravi aukciju	10	11.91485574	3318.121094	1064.759766	2171.707031	1083.649219	1	1	1
Napravi aukciju	100	97.59321356	3388.754297	1113.002734	2269.21875	1123.885938	1	1	1
Licitacija	1	1.993902063	3339.339453	1074.830469	2182.546484	1075.435547	1	1	1
Licitacija	10	10.87411463	3369.020703	1084.076953	2208.445703	1080.683594	1	1	1
Licitacija	100	90.41328239	3426.279297	1118.313672	2301.666016	1114.130078	1	1	1
Napravi EO	1	0.4158784628	3202.453906	1887.553125	2033.364844	2008.314453	1	1	1
Napravi EO	10	1.063984632	3207.1	1887.603906	2053.876563	2027.280859	1	2	2
Napravi EO	100	33.56386604	3236.928906	1888.436328	2122.100781	2060.168359	1	2	2
Napravi aukciju	1	1.611311436	3380.9625	2097.209766	2153.563281	2083.884766	1	2	2
Napravi aukciju	10	14.57189522	3408.476953	2114.441016	2174.308594	2096.895313	1	2	2
Napravi aukciju	100	115.8809013	3464.047266	2202.591406	2288.695313	2189.138281	1	2	2
Licitacija	1	2.423019409	3331.592188	2096.728906	2186.587891	2104.943359	1	2	2
Licitacija	10	13.73707099	3363.899609	2117.65	2215.892578	2122.436328	1	2	2
Licitacija	100	109.1849376	3416.267578	2199.594531	2311.935938	2195.196484	1	2	2
Napravi EO	1	0.4036344051	4130.114063	1 872.839844	2963.416797	2012.046094	1	3	3
Napravi EO	10	1.054475427	4133.966797	1872.847266	2979.991797	2026.614063	1	3	3
Napravi EO	100	33.89674814	4163.454297	1873.671094	3044.632031	2055.370313	1	3	3
Napravi aukciju	1	2.060139132	4368.698828	2117.591016	3196.367969	2079.007813	1	3	3
Napravi aukciju	10	19.09044008	4408.5625	2133.086328	3244.381641	2093.234766	1	3	3
Napravi aukciju	100	155.9922281	4492.162109	2226.704297	3413.183594	2179.607422	1	3	3
Licitacija	1	3.02465992	4361.349219	2045.883203	3218.747266	2087.675781	1	3	3
Licitacija	10	17.40516045	4399.825	2063.796484	3259.993359	2106.437891	1	3	3
Licitacija	100	144.9875921	4488.941016	2146.169922	3385.785938	2180.966797	1	3	3
Napravi EO	1	0.415692091	5216.021094	2864.540234	3964.842188	3894.884766	6	3	3
Napravi EO	10	1.12199595	5216.330859	2864.587891	3982.559766	3909.970313	6	3	3
Napravi EO	100	34.1396301	5252.458984	2865.774609	4045.063672	3938.542969	6	3	3
Napravi aukciju	1	2.922726583	5507.261328	3083.811328	4208.800781	4149.601563	6	3	3
Napravi aukciju	10	26.58128347	5553.704297	3112.78125	4263.933984	4194.892969	6	3	3
Napravi aukciju	100	227.4582787	5666.621875	3247.724219	4523.659375	4355.055078	6	3	3
Licitacija	1	4.205446887	5516.778516	3157.141797	4274.126563	4146.891016	6	3	3
Licitacija	10	26.37287612	5574.294141	3190.482422	4329.971484	4184.867578	6	3	3
Licitacija	100	220.4292062	5683.23125	3322.044922	4507.055078	4353.710547	6	3	3
Napravi EO	1	0.4246389866	6001.236328	4755.261719	4869.816406	4855.819922	6	3	8
Napravi EO	10	1.162071085	6001.854297	4756.3	4889.200781	4884.985938	6	3	8
Napravi EO	100	34.02872758	6030.559375	4757.389453	4950.504688	4912.437891	6	3	8
Napravi aukciju	1	4.069282198	6155.267188	5125.063672	5289.025781	5173.345703	6	3	8
Napravi aukciju	10	36.31089351	6211.9875	5172.413281	5347.507422	5225.724219	6	3	8
Napravi aukciju	100	313.3920515	6348.180078	5376.060547	5632.743359	5401.240625	6	3	8
Licitacija	1	5.633585358	6397.954297	5252.353906	5316.376563	5247.919922	6	3	8
Licitacija	10	36.01997879	6481.709375	5312.489844	5396.553125	5303.409766	6	3	8
Licitacija	100	295.9410181	6619.937891	5496.988672	5610.573047	5479.366406	6	3	8
Napravi EO	1	0.3970281601	8936.914063	7633.178516	6785.983984	6749.901953	9	6	12
Napravi EO	10	1.034940577	8939.008594	7633.435938	6806.424609	6772.094531	9	6	12
Napravi EO	100	34.2040277	8969.632813	7635.467188	6866.245313	6801.075391	9	6	12
Napravi aukciju	1	5.439355707	9449.114844	8284.338281	7352.723828	7285.842969	9	6	12
Napravi aukciju	10	52.19615872	9552.797266	8444.939453	7521.745313	7422.146094	9	6	12
Napravi aukciju	100	451.489703	9755.910156	8676.216406	7881.416797	7649.8	9	6	12
Licitacija	1	8.048514509	9531.021875	8438.997656	7474.367969	7360.161328	9	6	12
Licitacija	10	49.80653117	9692.317969	8598.692969	7599.281641	7488.605859	9	6	12
Licitacija	100	422.1665562	9877.513281	8847.736719	7883.316797	7682.270703	9	6	12

Tabela A.3: Usrednjeni rezultati potrošnje računarskih resursa za drugu grupu eksperimenata

Komanda	Broj poziva	Proteklo vreme (s)	Mem. Omega (MB)	Mem. Alfa (MB)	Mem. Beta (MB)	Mem. Gama (MB)	Prozjumer	Proizvođač	Korisnik
Napravi EO	1	0.404326272	3204.844531	1976.420703	3018.864844	1976.658203	1	1	1
Napravi EO	10	1.050165176	3206.586328	1993.560156	3041.1875	2037.223438	1	1	1
Napravi EO	100	33.293576	3235.114453	2021.389844	3102.014844	2058.666406	1	1	1
Napravi aukciju	1	1.853439403	3338.240625	2117.760156	3173.649609	2077.164844	1	1	1
Napravi aukciju	10	16.79988744	3363.275	2151.955859	3243.011719	2129.292578	1	1	1
Napravi aukciju	100	140.9566361	3433.755469	2227.028125	3389.767578	2209.24375	1	1	1
Licitacija	1	2.709034538	3303.886328	2021.659766	3258.128125	2045.225	1	1	1
Licitacija	10	15.68501985	3327.440625	2034.186328	3296.562891	2057.665625	1	1	1
Licitacija	100	130.7079733	3389.369531	2075.205469	3434.518359	2097.288672	1	1	1
Napravi EO	1	0.4112352133	3242.317188	2928.904297	2976.747266	2973.961328	1	2	2
Napravi EO	10	1.089290237	3247.061328	2944.988672	3001.086328	2998.853125	1	2	2
Napravi EO	100	36.52169991	3269.26875	2967.868359	3054.878125	3021.746484	1	2	2
Napravi aukciju	1	2.279201174	3337.65625	3182.316016	3166.922656	3121.815234	1	2	2
Napravi aukciju	10	20.65844743	3364.096484	3209.73125	3214.232031	3150.663672	1	2	2
Napravi aukciju	100	170.7554592	3425.060547	3329.742188	3401.837891	3273.546484	1	2	2
Licitacija	1	3.1002316	3398.582813	3147.801953	3250.695703	3136.443359	1	2	2
Licitacija	10	19.43953981	3435.177734	3181.246484	3298.621094	3164.901172	1	2	2
Licitacija	100	158.4610065	3487.396094	3299.332813	3427.215234	3283.810938	1	2	2
Napravi EO	1	0.4224737883	4149.948828	2910.361719	3888.926563	2924.164063	1	3	3
Napravi EO	10	0.9385005236	4152.835938	2931.861719	3911.370313	2947.568359	1	3	3
Napravi EO	100	36.55840933	4180.365234	2964.698828	3969.135938	2973.246875	1	3	3
Napravi aukciju	1	2.727374601	4270.992969	3107.566406	4224.190234	3135.583984	1	3	3
Napravi aukciju	10	24.93791313	4305.754688	3137.703125	4281.299609	3165.067188	1	3	3
Napravi aukciju	100	208.8390006	4389.523438	3272.743359	4546.207813	3284.539453	1	3	3
Licitacija	1	3.763844657	4285.450781	3113.268359	4237.892969	3127.119922	1	3	3
Licitacija	10	22.42260296	4327.08125	3140.086328	4289.654688	3154.837891	1	3	3
Licitacija	100	188.428098	4404.810938	3265.486719	4460.231641	3265.416016	1	3	3
Napravi EO	1	0.4007296801	5080.842969	3867.352344	4844.641016	4809.114844	6	3	3
Napravi EO	10	1.203856206	5088.650391	3896.222266	4870.465234	4845.368359	6	3	3
Napravi EO	100	37.01138706	5112.499219	3921.503906	4922.909766	4872.082813	6	3	3
Napravi aukciju	1	3.582426047	5296.535547	4181.604688	5219.014844	5180.552344	6	3	3
Napravi aukciju	10	32.57803924	5343.844922	4231.654297	5286.768359	5236.330469	6	3	3
Napravi aukciju	100	280.7012481	5453.23125	4369.858203	5590.394141	5410.214844	6	3	3
Licitacija	1	5.147039914	5299.992578	4180.73125	5306.607422	5232.280859	6	3	3
Licitacija	10	32.35625081	5357.498438	4230.002734	5376.584375	5291.530469	6	3	3
Licitacija	100	266.7742836	5460.627734	4362.328516	5574.857422	5461.094141	6	3	3
Napravi EO	1	0.4027187824	6040.041797	5743.700781	5850.523438	5808.683984	6	3	8
Napravi EO	10	1.026620746	6039.666406	5751.871875	5875.379297	5831.585938	6	3	8
Napravi EO	100	36.55678749	6065.6875	5780.817969	5933.236719	5858.475391	6	3	8
Napravi aukciju	1	4.480982256	6262.033984	6210.613281	6258.424219	6206.787891	6	3	8
Napravi aukciju	10	41.45704706	6328.014844	6279.044922	6348.075391	6269.271484	6	3	8
Napravi aukciju	100	361.926518	6462.16523	6528.698828	6662.260547	6502.972266	6	3	8
Licitacija	1	6.432196331	6377.289844	6282.036719	6360.808594	6287.63125	6	3	8
Licitacija	10	39.04406204	6471.861719	6361.287109	6444.059375	6359.470313	6	3	8
Licitacija	100	326.79725	6591.266797	6560.676953	6714.737891	6576.951563	6	3	8
Napravi EO	1	0.4171641111	8875.662891	8676.414453	7757.042969	7690.397266	9	6	12
Napravi EO	10	1.094997501	8875.990234	8701.379297	7784.930859	7722.564844	9	6	12
Napravi EO	100	35.64387255	8901.534375	8724.809375	7836.632031	7740.516016	9	6	12
Napravi aukciju	1	6.252586961	9322.391016	9459.951563	8465.669922	8323.811328	9	6	12
Napravi aukciju	10	61.65466986	9427.217578	9612.682031	8619.130078	8447.576953	9	6	12
Napravi aukciju	100	536.6356452	9634.703906	9911.125391	9001.101172	8711.680859	9	6	12
Licitacija	1	8.707859349	9625.554297	9614.326172	8559.888281	8476.144141	9	6	12
Licitacija	10	55.85438218	9779.459766	9784.918359	8727.239844	8611.823438	9	6	12
Licitacija	100	494.3615665	9974.777734	10047.31992	9039.204297	8865.270703	9	6	12

Dodatak B

Pseudokodovi tokova

Listing 1 prikazuje pseudokod toka za pravljenje novog energetskog obećanja. Cilj pseudokoda je bolje razumevanje detalja neophodnih da se napravi novo energetsko obećanje. Takođe, pseudo-kod otkriva učesnike u toku kao i ulogu svakog učesnika u procesu finalizacije transakcije čiji je krajnji rezultat stanje energetskog obećanja.

Algoritam 1: Tok kreiranja energetskog obećanja

% Inicijator pokreće deo toka koji je zadužen za započinjanje algoritma i predstavlja ulaznu tačku u ceo proces trgovanja energijom. %

Inicijatorski tok:
Dohvati dostupnog notara iz mrežne tabele
ako Inicijatorski čvor nije Proizvođač, Prozjumer ili Elektroprivreda **onda**
    throw Neautorizovana akcija
kraj ako
Kreiraj graditelja transakcije
ako Inicijatorska strana ima dovoljno sredstava **onda**
    Prenesi sredstva kao depozit na račun Mrežnog kontrolnog tela
u suprotnom
    throw Nedovoljno sredstva
kraj ako
Kreiraj stanje energetskog obećanja i inkorporiraj ga u transakciju
Potpiši transakciju
Pošalji transakciju toku odgovora na čvor kontrolnog tela na potpisivanje
Prikupi potpis od kontolnog tela
ako Transakcija je verifikovana i potpisana od strane inicijatora i kontrolnog tela **onda**
    Sačuvaj transakciju u bazu podataka
u suprotnom
    throw Transakcija nije verifikovana
kraj ako

% Tok odgovora se pokreće na čvorovima koji učestvuju u transakciji i čiji potpis je neophodan da bi se transakcija finalizovala. %

Tok odgovora:
Primi transakciju od inicijatora
ako Transakcija je validna **onda**

```
    Potpiši transakciju
    Pošalji potpisanu transakciju inicijatoru
u suprotnom
    throw Nevalidna transakcija
kraj ako
ako Čvor jeste verifikaciona agencija onda
    ako Su tvrdnje inicijatora o izvoru električne energije istinite onda
        Povrdi tvrdnje o izvoru proizvedene energije
    u suprotnom
        Opovrgni tvrdnje o izvoru proizvedene energije
    kraj ako
kraj ako
ako Transakcija je verifikovana i potpisana od strane inicijatora i Elektroprivrede onda
    Sačuvaj transakciju u bazi podataka
kraj ako
```

Listing 2 prikazuje pseudo-kod toka za proveru isporuke energije koja je obećana. Ovaj tok se automatski pokreće do strane mrežnog kontrolnog tela nakon isteka energetskog obećanja. Cilj pseudo-koda je bolje razumevanje detalja neophodnih za proveru isporuke električne energije koja je prethodno obećana. Takođe, pseudo-kod otkriva učesnike u toku kao uslove koji moraju biti ispunjeno da bi se obećanje proglasilo kao ispunjeno.

Algoritam 2: Tok provere isporuke energije

```
Inicijatorski tok:
Dohvati dostupnog notara iz mrežne tabele
Kreiraj graditelja transakcije
ako Energetsko obećanje je ispunjeno onda
    Smanji deponovana sredstva za naknadu održavanja mreže
    Vrati smanjena deponovana sredstva dobavljaču (članu ko je napravio energetsko obećanje)
    Zabeleži da je energetsko obećanje ispunjeno
    Postavi izmenjeno stanje energetskog obećanja u novu transakciju
    Potpiši transakciju
    Pošalji potpisanu transakciju dobavljaču
    ako Transakcija je verifikovana i potpisana od strane kontrolnog tela i dobavljača onda
        Sačuvaj transakciju u bazu podataka
    u suprotnom
        throw Transakcija nije verifikovana
    kraj ako
u suprotnom
```

```
17:     Smanji deponovana sredstva za naknadu za održavanje mreže
18:     Pošalji smanjena deponovana sredstva Elektroprivredi kao naknadu za hitnu isporuku
19:     Zabeleži da energetsko obećanje nije ispunjeno
20:     Postavi modifikovano energetsko obećanje u novu transakciju
21:     Potpiši transakciju
22:     Pošalji potpisanu transakciju Elektroprivredi
23:     ako Transakcija je verifikovana i potpisana od strane kontrolnoge tela i elektroprivrede
    onda
24:         Sačuvaj transakciju u bazu podataka
25:     u suprotnom
26:         throw Transakcija nije verifikovana
27:     kraj ako
28: kraj ako
29: Tok odgovora:
30: Primi transakciju od Elektroprivrede
31: ako Transakcija je validna onda
32:     Potpiši transakciju
33:     Pošalji potpisanu transakciju Elektroprivredi
34: u suprotnom
35:     throw Nevalidna transakcija izuzetak
36: kraj ako
37: ako Transakcija je verifikovana i potpisana od strane Elektroprivrede/Dobavljača i GA
    onda
38:     Sačuvaj transakciju u trezoru
39: kraj ako
```

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Развој децентрализованог система са дистрибуираном главном књигом за подршку трговању енергијом
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Рачунарство и аутоматика.
1. Опис података
1.1 Врста студије У докторској дисертацији представљен је предлог архитектуре дистрибуираног софтверског система за подршку трговању енергијом. Поред предлога архитектуре, представљена је и методологија за мерење перформанси дистрибуираног система према којој је извршен низ експеримената. 1.2 Врсте података **а) квантитативни** б) квалитативни 1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту_____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту_____ е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: добијени мерењем перформанси дистрибуираног система

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____

b) SPSS фајл, датотека _____

c) PDF фајл, датотека _____

d) Текст фајл, датотека _____

e) JPG фајл, датотека _____

f) **Остало, датотека** ЦСВ датотеке

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) **број варијабли** потрошња РАМ меморије, време извршавања скупа трансакција, потрошња електричне енергије

б) **број мерења** (испитаника, процена, снимака и сл.) 1080 мерења

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) **временски размак између поновљених мера:** мерења су извршавана непосредно једна после других

б) **варијабле које се више пута мере односе се на:** потрошњу РАМ меморије, време извршавања трансакција

в) **нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као:** сва мерења се налазе у истом фајлу. Поновљена мерења су означена у колони **итерација** која има вредност од 1 до 10

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

_____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) **експеримент**, тестиране су перформансе система у 12 експеримената и подаци су прикупљени употребом рачунарских скрипти за праћење потрошње ресурса

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип _____

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Мерење утрошене РАМ меморије и време извршавања трансакција су добијени употребом Пајтон скрипти за мерење перформанси. Мерење потрошње електричне енергије је извршено употребом индустријског уређаја Ц.А. 8336

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? **Да** Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) **Колики је број недостајућих података?** Мерење потрошње енергије је урађено само за подскуп експеримената. 81 од 1080 мерења има податке о потрошњи енергије

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

_____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Свако од мерења RAM меморије и времена извршавања трансакција је урађено 10 пута како би се осигурао висок квалитет података.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Подаци су уношени у матрицу аутоматски употребом рачунарских скрипти уз надзор истраживача. На тај начин се умањује шанса за грешке при уносу.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

*3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Zenodo** репозиторијум.*

3.1.2. URL адреса https://zenodo.org/records/17135909

3.1.3. DOI https://doi.org/10.5281/zenodo.17135909

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) ***Да***

б) *Да, али после ембарга који ће трајати до* _____

в) *Не*

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

_____

_____

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? Стандард који примењује Zenodo репозиторијум за складиштење истраживачких резултата.

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Nebojša Horvat, Performance Evaluation of a Distributed Ledger-Based Platform for Renewable Energy Trading

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

_____

_____

_____

_____

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? **Неограничено**

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

_____

_____

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

_____

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

а) Подаци нису у отвореном приступу

б) Подаци су анонимизирани

ц) Остало, навести шта

_____

_____

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) ***јавно доступни***

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

_____

_____

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

_____

_____

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Creative Commons Attribution 4.0 International

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Небојша Хорват, nebojshahorvat@gmail.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Небојша Хорват, nebojshahorvat@gmail.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Небојша Хорват, nebojshahorvat@gmail.com