



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Nemanja Popović

**NAPREDNI DISTRIBUTIVNI
MENADŽMENT SISTEM ZASNOVAN NA
CLOUD INFRASTRUKTURI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2018.



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Мастер Немања Поповић
Ментор, МН:	др Срђан Вукмировић, ванредни професор др Раде Дорословачки, редовни професор
Наслов рада, НР:	Напредни дистрибутивни менаџмент систем заснован на <i>Cloud</i> инфраструктури
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2018
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9/85/53/8/25/0/0
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Примењени софтверски инжењеринг
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	НДМС, Клауд Инфраструктура, Паметне мреже, ИТ/ОТ, Виртуализација
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Важна напомена, ВН:	



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Извод, ИЗ:	У овој докторској дисертацији испитана је могућност пребацивања Напредног Дистрибутивног Менаџмент Система (НДМС) заснованог на заједничкој операционо технолошкој платформи на виртуално Cloud инфраструктурно окружење. Прво је одабрано традиционално НДМС решење засновано на физичкој рачунарској архитектури и идентификовани су функционални блокови. Затим су профилиране њихове перформансе према четири кључна ресурса: процесор, оперативна меморија, рачунарска мрежа и стална меморија. Даље предложено је виртуално решење засновано на Cloud инфраструктури које је верификовано на две замишљене електродистрибутивне мреже реалних величина (малој и великој) и у два тестна сценарија (стабилног стања и високе активности). На крају представљени су резултати тестирања који показују да се НДМС може пребацивати у виртуално Cloud окружење без негативног утицаја на функционалне и нефункционалне захтеве НДМС решења.		
Датум прихватања теме, ДП:			
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	Ред. проф. др Владимир Стрезоски	
	Члан:	Проф. емеритус Владимир Ковачевић	
	Члан:	Ред. проф. др Душан Малбашки	Потпис ментора
	Члан, ментор:	Ван. проф. др Срђан Вукмировић	
	Члан, ментор:	Ред. проф. др Раде Дорословачки	

Образац **Q2.НА.04-05** - Издање 1



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. thesis
Author, AU :	Nemanja Popović, M.Sc.
Mentor, MN :	Srđan Vukmirović, Ph.D., Associate Professor Rade Doroslovački, Ph.D., Full Professor
Title, TI :	Cloud Infrastructure-based Advanced Distribution Management System
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2018
Publisher, PB :	Authore reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (<u>chapters/pages/ref./tables/pictures/graph</u>)	9/85/53/8/25/0/0
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	Applied software engineering
Subject/Key words, S/KW :	ADMS, Cloud Infrastructure, Smart Grid, IT/OT, Virtualization
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>This dissertation inspects the possibility of transferring the Advanced Distribution Management System (ADMS) based on a common operating technology platform to the virtual Cloud Infrastructure Environment. First, a traditional ADMS solution based on physical computing architecture was chosen and functional blocks were identified. Furthermore, their performances were profiled to four key resources: processor, operating memory, computer network, and storage. Then, virtual cloud-based solution was proposed based on Cloud infrastructure which is verified on two imaginary power distribution networks of real size (small and large) and in two test scenarios (steady state and high activity). Finally, the test results show that ADMS can be transferred to a virtual Cloud environment without adversely affecting the functional and non-functional requirements of the ADMS solution.</p>



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accepted by the Scientific Board on, ASB:			
Defended on, DE:			
Defended Board, DB:	President:	Full Professor PhD Vladimir Strezoski	
	Member:	Professor emeritus PhD Vladimir Kovačević	
	Member:	Full Professor PhD Dušan Malbaški	Menthor's sign
	Member, Mentor:	Assistant Professor PhD Srdjan Vukmirović	
	Member, Mentor:	Full Professor PhD Rade Doroslovački	

Obrazac **Q2.HA.04-05** - Izdanje 1

Pre svih zahvaljujem se na beskrajnoj podršci ocu Draganu, majci Janji, bratu Aleksi i budućoj supruzi Jovani.

Zahvaljujem se svom kolegi Ivanu Šeškaru sa kojim sam učestvovao u naučnoj saradnji i koji me je veoma inspirativno savetovao tokom doktorskih studija.

Posebno se zahvaljujem svojim mentorima prof. dr Radetu Doroslovačkom i prof. dr Srđanu Vukmiroviću.

Zahvaljujem se prof. Vladimiru Kovačeviću za nadzor i usmeravanje mog školovanja tokom osnovnih i master akademskih studija.

Zahvaljujem se svom razrednom starešini prof. dr Radivoju Stojkoviću za nadzor i usmeravanje mog školovanja tokom srednje škole.

Zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima sa kojima sam sarađivao, uz koje sam tehnički napredovao i koji su mi pomogli u tehničkoj obradi teksta.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	14
2. PREGLED AKTUELNOG STANJA U OBLASTI.....	18
2.1. Prednosti Cloud računarstva	18
2.2. Kompleksnost razvoja modernih rešenja u elektroenergetici	18
2.3. Primene Cloud računarstva u elektroenergetici	20
3. NAPREDNI DISTRIBUTIVNI MENADŽMENT SISTEM.....	23
3.1. IT Infrastruktura	23
3.2. IT Platforma	24
3.3. OT Platforma.....	25
3.4. OT Aplikacije	26
3.4.1. SCADA	26
3.4.2. DMS.....	27
3.4.3. OMS.....	28
3.4.4. WOM	28
3.4.5. MG.....	29
3.4.6. DERMS	29
3.4.7. Sistem za upravljanje posadama na terenu.....	30
3.4.8. OAM	30
4. VIRTUALIZACIJA I CLOUD RAČUNARSTVO	31
4.1. Virtualizacija	31
4.2. Cloud računarstvo	32
4.2.1. Cloud tehnologije	32
4.2.2. Cloud Servisi	34
5. KOMBINATORNE METODE ZA PRIDRUŽIVANJE VIRTUALNIH I FIZIČKIH MAŠINA SISTEMIMA.....	36
5.1. Objekti se razlikuju i kontejneri se razlikuju	36
5.2. Objekti se ne razlikuju i kontejneri se razlikuju.....	39
5.3. Objekti se razlikuju i kontejneri se ne razlikuju.....	39
5.4. Objekti se ne razlikuju i kontejneri se ne razlikuju	40

6. TRADICIONALNO ADMS REŠENJE.....	41
6.1. Funkcionalni blokovi.....	41
6.2. Organizacija sistema i podsistema	44
6.3. Tokovi podataka.....	45
6.3.1. Komunikacija sa uređajima u polju	45
6.3.2. Komunikacija u klasteru	46
6.3.3. Promene u modelu podataka	48
7. METODOLOGIJA ZA VIRTUALIZACIJU ADMS REŠENJA.....	51
7.1. Identifikacija.....	51
7.2. Profiliranje performansi	52
7.3. Pravljenje kataloga virtualnih mašina	52
7.4. Rezervacija servera	53
7.5. Pridruživanje virtualnih mašina.....	53
7.6. Verifikacija i analiza prednosti rešenja.....	54
8. VIRTUALNO CLOUD ADMS REŠENJE.....	55
8.1. Testno okruženje	55
8.1.1. Računarske i softverske komponente	55
8.1.2. Testne šeme	56
8.1.3. Testovi.....	58
8.2. Identifikacija.....	59
8.3. Profiliranje performansi	62
8.4. Pravljenje kataloga virtualnih mašina	72
8.5. Rezervacija servera	72
8.6. Pridruživanje virtualnih mašina.....	73
8.7. Verifikacija i analiza poboljšanja	76
9. ZAKLJUČAK.....	80
LITERATURA	82
BIOGRAFIJA I BIBLIOGRAFIJA AUTORA.....	86
Biografija	86
Bibliografija.....	86

SPISAK SKRAĆENICA

Skraćenica	Engleski termin	Srpski termin
ADMS	<i>Advanced Distribution Management System</i>	Napredni distributivni menadžment sistem
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>	Napredna merna infrastruktura
CIM	<i>Common Information Model</i>	Standard za modelovanje podataka elektroenergetskih sistema
DB	<i>Database</i>	Baza podataka
DC	<i>Domain Controller</i>	Domenski kontroler
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>	Distribuirani energetske izvori
DERMS	<i>Distributed Energy Resources Management System</i>	Sistem za upravljanje distribuiranim energetskim resursima
DMS	<i>Distribution Management System</i>	Distributivni menadžment sistem
DMSR	<i>Distribution Management System Real-Time Instance</i>	Server distributivnog menadžment sistema za rad u realnom vremenu
DMSS	<i>Distribution Management System Simulation Instance</i>	Server distributivnog menadžment sistema za rad u simulacionom režimu
DR	<i>Demand Response</i>	Upravljanje opterećenjem
EMS	<i>Energy Management System</i>	Sistem za upravljanje prenosnom elektroenergetskom mrežom
FEP	<i>Front End Processor</i>	Akviziono upravljačka jedinica
FLISR	<i>Fault Location, Isolation and Supply Restoration</i>	Detekcija i izolacija kvara, i obnavljanje napajanja
FS	<i>Field Simulator</i>	Simulator polja
GB	<i>Gigabyte</i>	Gigabajt
GIS	<i>Geographic Information System</i>	Geografsko informacioni sistem

Skraćenica	Engleski termin	Srpski termin
HPC	<i>High Performance Computing</i>	Računarski sistemi visokih performansi
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	Međunarodna komisija za standardizaciju u oblasti elektrotehnike
IED	<i>Intelligent electronic device</i>	Inteligentni elektronski uređaj
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Institut za Inžinjere Elektrotehnike i Elektronike
IOPS	<i>Input/output operations per second</i>	Broj ulazno/izlaznih operacija po sekundi
IT	<i>Information Technology</i>	Informacione tehnologije
ITSM	<i>Information Technology Service Management</i>	Upravljanje informatičkim uslugama
MT	<i>Management Tools</i>	Upravljački alati
MB	<i>Megabyte</i>	Megabajt
MG	<i>Micro Grid</i>	Mikromreža
MWM	<i>Mobile Workforce Management</i>	Sistem za upravljanje posadama na terenu
NERC CIP	<i>North American Electric Reliability Corporation Critical Infrastructure Protection</i>	Severnoamerička korporacija za elektrotehničku pouzdanost standard za zaštitu kritične infrastrukture
NUMA	<i>Non-uniform memory access</i>	Memorija sa neuniformnim pristupom
OAM	<i>Operational Asset Management</i>	Sistem za operativno upravljanje imovinom
OMS	<i>Outage Management System</i>	Sistem za upravljanje ispadima
OS	<i>Operating System</i>	Operativni sistem
OT	<i>Operation Technology</i>	Operacione tehnologije
PM	<i>Physical Machine</i>	Računar

Skraćenica	Engleski termin	Srpski termin
RA	<i>Remote Access</i>	Daljinski pristup
RAM	<i>Random Access Memory</i>	Operativna (radna) memorija
RBAC	<i>Role-based Access Control</i>	Kontrola pristupa zasnovana na korisničkim ulogama
RTU	<i>Remote terminal unit</i>	Daljinski telemetrisani uređaj
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition</i>	Akviziciono-upravljajući sistem
SG	<i>Smart Grid</i>	Pametna mreža
WOM	<i>Work Order Management</i>	Sistem za upravljanje radnim nalogima

SPISAK SLIKA

Slika 1: ADMS softverska arhitektura	23
Slika 2: Tradicionalno ADMS rešenje	41
Slika 3: Tok podataka između korisničke aplikacije i uređaja u polju.....	46
Slika 4: Tok podataka između operatera i polja (režim visoke dostupnosti).....	46
Slika 5: Tok podataka između polja i operatera (režim visoke dostupnosti).....	47
Slika 6: Tok podataka između operatera i polja (sa pomoćnim sistemom).....	47
Slika 7: Tok podataka između polja i operatera (sa pomoćnim sistemom).....	48
Slika 8: Tok podataka pri promeni modela.....	49
Slika 9: Tradicionalno ADMS rešenje	59
Slika 10: Iskorišćenje procesora	62
Slika 11: Iskorišćenje operativne memorije	63
Slika 12: Iskorišćenje mreže	64
Slika 13: Protok podataka stalne memorije	65
Slika 14: Broj ulazno/izlaznih operacija stalne memorije	66
Slika 15: Varijacije iskorišćenja procesora za DMSR	67
Slika 16: Varijacije iskorišćenja operativne memorije za FEP.....	67
Slika 17: Prosečno iskorišćenje procesora.....	68
Slika 18: Prosečno iskorišćenje operativne memorije.....	69
Slika 19: Prosečni protok podataka stalne memorije	70
Slika 20: Prosečni broj ulazno/izlaznih operacija stalne memorije	70
Slika 21: Prosečno iskorišćenje mreže	71
Slika 22: Virtualno ADMS rešenje	75
Slika 23: Tradicionalno i Virtualno ADMS rešenje.....	76
Slika 24: Iskorišćenje resursa na fizičkoj mašini	77
Slika 25: Trendovi iskorišćenja resursa.....	78

SPISAK TABELA

Tabela 1: Metrike performansi.....	52
Tabela 2: Specifikacija računarskih komponenti.....	56
Tabela 3: Kategorizacija elektrodistributivnih preduzeća	56
Tabela 4: Specifikacija testnih šema	58
Tabela 5: Identifikovani sistemi i podsistemi	60
Tabela 6: Katalog virtualnih mašina	72
Tabela 7: Pridruživanje virtualnih mašina.....	75
Tabela 8: Prednosti virtualnog ADMS rešenja	79

1. UVOD

Današnje elektroenergetske infrastrukture su dizajnirane i izgrađene prema zahtevima i inženjerskim praksama 20. veka. Sa porastom populacije, razvojem tehnologije, razvojem industrije i porastom broja električnih uređaja potreba za električnom energijom je značajno porasla. Nagli porast potražnje električne energije zajedno sa zagađenjem životne sredine, usmerio je učesnike elektroenergetske industrije da se okrenu ka alternativnim zelenim distribuiranim izvorima energije – solarnoj energiji, energiji vetra, energetske skladištima itd. U distributivnim sistemima povećao se i broj instaliranih uređaja kao što su elektronski konvertori snage, pametni rasklopni uređaji i ostala oprema, sistem za upravljanje distribuiranim energetske resursima (*eng. Distributed Energy Resources Management System - DERMS*), upravljanje opterećenjem (*eng. Demand Response – DR*), pametne kuće i zgrade, skladišta energije, punjači električnih vozila, napredna merna infrastruktura (*eng. Advanced Metering Infrastructure – AMI*), mikromreže (*eng. Micro Grid - MG*). Prisustvo ovih uređaja značajno je uticalo na povećanje opterećenja, kompleksnosti i donelo nove izazove u upravljanju elektrodistributivnim mrežama [[1]]. Da bi se maksimizovao efekat svih tih novih uređaja i tehnologija, i postigao globalni optimum rada elektroenergetskog sistema, neophodna je njihova potpuna integracija u jedno koordinisano rešenje pametnih mreža (*eng. Smart Grid - SG*)[[2]]. Jezgro tog Informaciono-tehnološkog (*eng. Information Technology - IT*) i Operaciono-tehnološkog (*eng. Operation Technology - OT*) rešenja u pametnim mrežama je Distributivni Menadžment Sistem (*eng. Distribution Management System -DMS*) [[3]], [[4]]. *DMS* je sveobuhvatni skup softverskih paketa, izgrađenih i integrisanih na zajedničkoj *OT* platformi, dizajniranih da omogućе prikaz trenutnog stanja mreže (nadzor, alarme, izveštaje itd.), operativno upravljanje (upravljanje redosledom manipulacija, optimizacija naponskog nivoa, odsecanje vršnog opterećenja, upravljanje kvarovima i ispadima, rekonfiguracija mreže) i optimizaciju rada (minimizacija gubitaka, optimizacija napona i reaktivnih snaga, pouzdanost, bezbednost, itd), kao i planiranje rada mreže sa uzročno-posledičnom simulacijom i planiranje razvoja mreže. Proširenjem ovih ključnih *DMS* funkcija za rad u realnom vremenu dodavanjem optimizacije napona i reaktivnih snaga u zatvorenoj petlji i upravljanjem kvarovima, upravljanja i razvoja mrežom stvara se napredni distributivni menadžment sistem (*eng. Advanced Distribution Management System – ADMS*) [[5]], [[6]], [[7]]. Elektroenergetski sistemi se dele na 1) proizvodne, 2) prenosne i 3) distributivne. Prenosni sistemi imaju mnogo energetske izvora, aktivnih elemenata i zbog svoje važnosti su observabilni i kontrolabilni. Sa druge strane, distributivni sistemi su pasivni, sa malim brojem aktivnih elemenata, neobservabilni i nekontrolabilni. Za upravljanje

elektroenergetskim sistemima koriste se informacione tehnologije koje omogućuju rukovanje podacima i operacione tehnologije koje omogućuju upravljanje uređajima u polju.

Za upravljanje prenosnim sistemima koriste se sledeći sistemi:

- 1) Nadzorno-upravljački sistem (*eng. Supervisor Control and Data Acquisition - SCADA*),
- 2) Sistem za upravljanje prenosnom elektroenergetskom mrežom (*eng. Energy Management System - EMS*),
- 3) Sistem za upravljanje ispadima (*eng. Outage Management System - OMS*).

Za upravljanje distributivnim sistemima koriste se:

- 1) Geografsko Informacioni Sistem (*eng. Geographical Information System - GIS*),
- 2) Distributivna SCADA,
- 3) Sistem za upravljanje ispadima ,
- 4) Aplikativni paketi za simuliranje, planiranje i razvoj elektrodistributivne mreže.

Tradicionalno, ADMS se instalira na računarima koji se nalaze u prostorijama elektrodistributivnih preduzeća (*eng. on-premise*), a za njihovo operativno upravljanje, odgovorni su IT/OT servis menadžment timovi. Ovakva rešenja zahtevaju velike investicije za izgradnju elektrodistributivnih centara podataka i visoko-tehnološke servisne organizacije koje su sposobne da isporuče IT/OT podršku za sisteme sa kritičnom misijom. U takvom pristupu potrebno je proračunati kapacitete računarskih sistema tako da mogu da izdrže najveće predviđeno opterećenje sistema i planirana proširenja sistema. Tim koji upravlja računarskim komponentama mora da pruži podršku 24/7 bez obzira na stepen iskorišćenosti, jer sistemi sa kritičnom misijom su visoko kvalitetni i testirani, ali kada se dese kritični incidenti zahtevaju brz odziv. Pored toga, postoji rastuća potreba za integracijom sve većeg broja IT/OT aplikacija, pristup sve većeg broja korisnika (pored tradicionalnih korisnika iz kontrolnog centra, sve je veći broj korporativnih korisnika koji koriste IT/OT aplikacije), rastućom količinom podataka uslovljenom raznim faktorima (npr. uključivanje niskonaponskih delova mreže koji uvećavaju računarski model 5 do 50 puta). Rastuća potreba za unapred rezervisanim serverskim kapacitetima, uslovljena rastućim količinama podataka, brojem korisnika IT/OT aplikacija, rezultuje povećanjem ukupnog troška neophodnog za vođenje ovakvih rešenja. Uzimajući u obzir da ADMS sistem predstavlja sistem sa kritičnom misijom koji u savremenom dobu upravlja sve većim brojem uređaja, podržava sve veći broj aplikativnih paketa i korišćen je od sve većeg broja korisnika, postoji značajan izazov da se obezbedi adekvatno infrastrukturno okruženje i

odgovarajuće softversko rešenje koje može da obezbedi: 1) performanse, 2) skalabilnost, 3) otpornost na otkaze, 4) lako i brzo proširivanje kapaciteta, 5) odgovarajuću lakoću upravljanja i 6) ekonomsku isplativost.

Hipoteza ove doktorske disertacije je da je moguće migrirati tradicionalno *ADMS* rešenje zasnovano na fizičkoj arhitekturi u virtualno *Cloud* (v. odeljak 4.2) okruženje bez negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je ispitivanje mogućnosti migracije *ADMS-a* u virtualno *Cloud* okruženje bez negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema, predlog i verifikacija metodologije koja omogućava migracije produkcionih sistema koji pružaju softversku podršku malim i velikim elektrodistributivnim mrežama. Iz rezultata istraživanja obavljenih u okviru ove doktorske disertacije, deo rezultata je prihvaćen kao naučni rad u časopisu *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [[8]], kategorisan kao M21A.

Cilj istraživanja je ispitivanje mogućnosti migracije *ADMS-a*, sa kritičnom misijom, koja obuhvata aplikativne pakete za upravljanje u realnom vremenu i autonomnom režimu sa povremenim poravnanjem (*eng. offline*) na *Cloud* infrastrukturu.

Očekivani rezultati su da se:

- 1) Obezbedi napredno rešenje koje radi u virtualnom *Cloud* okruženju bez narušavanja funkcionalnih i nefunkcionalnih zahteva sistema,
- 2) Smanjenje broja fizičkih servera,
- 3) Uvažavanje fizičke segregacije sistema,
- 4) Skraćenje vremena potrebnog za oporavak u slučaju otkaza,
- 5) Skraćenje vremena potrebnog za pokretanje novih instanci i podsistema (grupe instanci),
- 6) Podržana je upotreba u *Cloud* okruženjima i u iznajmljenim virtualizovanim okruženjima, uz upotrebu servisnog poslovnog pristupa,
- 7) Omogućen je automatizovan rad i centralno upravljanje radom sistema (*eng. orchestration*).

Rezultat doktorske disertacije je predlog rešenja elektrodistributivnim preduzećima koje omogućuju smeštanje *ADMS-a* u iznajmljena virtualna *Cloud* rešenja bez neophodnosti kapitalnog investiranja u njihovu infrastrukturu i prebacivanje fokusa na njihovu osnovnu delatnost. Na taj način elektrodistributivna preduzeća dobijaju softverski alat kojim mogu optimalno da vode svoju mrežu, povoljno utiču na očuvanje

životne sredine, štede energetske izvore, povećavaju efikasnost i kvalitet isporuke električne energije.

Disertacija se sastoji iz devet poglavlja. U drugom poglavlju dat je pregled aktuelnog stanja u oblasti. Napredni Distributivni Menadžment Sistem opisan je u trećem poglavlju. Četvrto poglavlje predstavlja teorijske osnove virtualizacije i *Cloud* računarstva. Kombinatorne metode za pridruživanje virtualnih mašina fizičkim mašinama opisane su u petom poglavlju. Šesto poglavlje predstavlja tradicionalno *ADMS* rešenje, zasnovano na fizičkim računarima, koje je korišćeno kao polazna osnova za ovo istraživanje. Predložena metodologija korišćena za virtualizaciju *ADMS* sistema opisana je u sedmom poglavlju. Primena virtualizacione metodologije uključujući opis testnog okruženja i rezultate testiranja opisana je u osmom poglavlju. U devetom poglavlju je dat zaključak. Na kraju je navedena korišćena literatura i date su biografija i bibliografija autora.

2. PREGLED AKTUELNOG STANJA U OBLASTI

Uzimajući u obzir da se istraživanje ove doktorske disertacije nalazi u preseku dve oblasti - elektroenergetike i softverskog inženjeringa tj. upravljanja elektrodistributivnim sistemima i *Cloud* računarstva, postoji veliki broj naučnih istraživanja i udžbenika koji se bave ovim oblastima. Pregled aktuelnog stanja je podeljen u tri grupe naučnih radova. U prvu grupu [[9]-[14]] spadaju radovi koji opisuju prednosti primene *Cloud* računarstva. Druga grupa [[15]-[28]] radova pokazuje kompleksnost razvoja menadžment sistema za moderne elektrodistributivne mreže. Treća grupa radova [[29]-[39]] opisuje primenu *Cloud* računarstva u pametnim mrežama.

2.1. Prednosti *Cloud* računarstva

Jedan način da se poveća efikasnost razvoja aplikacija u *Cloud* okruženju prikazan je u [[9]]. U ovom radu opisan je način da se ostvari efikasniji i jeftiniji način rada sistema. Rezultati pokazuju da je moguće postići bolje performanse za 27%, a uz to smanjiti cenu sistema za 41% u odnosu na ekvivalentno rešenje koje nije u *Cloud*-u.

Prema modernim istraživanjama, može se zaključiti da će pametne mreže biti usko povezane sa računarstvom visokih performansi[[10]], da su *Cloud* platforme primenjive u računarstvu visokih performansi [[11]] i predstavljaju korisnu tehniku za prevazilaženje izazova u tradicionalnom upravljanju elektroenergetskih sistema [[12]].

Da virtualizacija računarskih resursa u velikim računarskim centrima može doneti značajne uštede pri razvoju rešenja pametnih mreža pokazano je u radu [[13]], dok je u radu [[14]] pokazano da *Cloud* pristup donosi sledeće prednosti: pristup velikom broju računarskih resursa na efikasan način, pojednostavljeno upravljanje sistemima, upravljanje udaljenim resursima, povećanu dostupnost podataka pomoću replikacije i redundantnosti računarskih centara i smanjenjem kapitalnih ulaganja. Zbog svega toga *Cloud* pristup omogućuje značajno smanjenje cene održavanja računarskih resursa.

2.2. Kompleksnost razvoja modernih rešenja u elektroenergetici

U radovima [[15]] i [[16]] dati su predlozi distribuiranih funkcija za obradu elektrodistributivne radialne mreže korišćenjem virtualizacije graničnih elemenata zasnovanim na distribuiranom modelu, dok obrada upetljenih elektrodistributivnih mreža ostaje nerešen problem. U radu [[15]] predloženo je jedno rešenje distribuirane topološke analize za elektrodistributivne mreže u realnom vremenu, dok je u radu [[16]] predložen distribuiran proračun tokova snaga.

Suočeno sa raznovrsnim situacijama inteligentno *DMS* okruženje zahteva implementaciju kompleksnih algoritama koji će upravljati izvršenjem različitih vrsta tokova aktivnosti koji dinamički pristižu radi obrade. Razvoj algoritma za raspodelu zadataka (od kojih su tokovi aktivnosti sačinjeni) je od najvišeg interesa u istraživanju, jer upotreba takvih algoritama predstavlja najbitniji deo optimizacije procesa rada *DMS*-a. U zavisnosti od specifičnih osobina računarskog klastera i karakteristika zadataka koji se analiziraju, različiti algoritmi koji podržavaju dinamičku strategiju raspodele zadataka su razvijeni i testirani [[17]].

U [[18]] autor predlaže novi kontroler *MG* koji upravlja i optimizuje radom *MG* u tri operativna režima rada, povezanom režimu gde je glavni cilj optimizacija rada u pogledu ekonomije i emisije CO₂, ostrvskom režimu pri kom je osnovni cilj održavanje učestanosti i naponskih prilika u okviru tehničkih granica i havarijskom režimu pri kom je osnovni cilj održavanje napajanja kritičnih potrošača. Kontroler je baziran na tehnologiji više-agentnog sistema i sastoji se od agenta realnog vremena zaduženog za upravljanje u zatvorenoj petlji, agenta operativnog planiranja zaduženog za optimizaciju i agenta stanja zaduženog za menadžment sistema.

Za efikasno funkcionisanje i potpunu iskorišćenost *ADMS* sistema u distributivnim preduzećima, neophodno je imati električni model distributivne mreže odgovarajućeg kvaliteta [[19]]. Održavanje kvaliteta električnog modela je uvek jedan od velikih izazova za distributivna preduzeća koja implementiraju *ADMS* sistem. Kvalitet modela se može značajno popraviti primenom specijalizovanih algoritama za detekciju, identifikaciju i estimaciju loših podataka električnog modela distributivne mreže, a ovi algoritmi su opisani u [[19]] i [[20]].

U radu [[21]] opisana je arhitektura sistema za komunikaciju sa pametnim meračima električne energije (*eng. Smart Meter*), dok je u radu [[22]] opisan jedan pristup optimizaciji rasporeda zadataka u sistemima pametnih mreža.

Rad [[23]] opisuje sistem za upravljanje distributivnim sistemima kao skup 26 međusobno kompatibilnih elektroenergetskih aplikacija. Sve one su integrisane u Distributivni Menadžment Sistem, kao unificirani softverski paket, korišćen u 4 različita operativna moda: Upravljanje operacijama, Operativno planiranje, Razvojno planiranje i analiza i Simulacija i trening. Ovakav ekspertni sistem obezbeđuje povećanje kvaliteta i kvantiteta isporučene energije, dok sa druge strane smanjuje troškove upravljanja i omogućava odlaganje investiranja u distributivni sistem.

Specijalizovani algoritmi za analizu i proračune u *DMS* sistemu su posebno razvijeni za potrebe efikasnijeg menadžmenta u distributivnim sistemima. Naime, većina algoritama ovakve vrste koji su razvijeni u poslednjih 40 godina se odnose na prenosne mreže (*EMS*). Usled više objektivnih razloga nije moguća direktna primena

ovih algoritama i na *DMS*, te je razvijen bogati skup specijalizovanih *DMS* algoritama koji su potpuno prilagođeni specifičnim osobinama distributivnih mreža: dominantno radijalan pogon, velike dimenzije mreže, visok odnos vrednosti odnosa R/X i redukovani skup merenja [[24]].

Rad [[25]] predstavlja kombinovani algoritam za determinaciju plana restauracije za napajanje radijalne distributivne mreže. Predloženi algoritam je zasnovan na konceptu lokalne mreže i rekonfiguracionog algoritma sa više rešenja i kao krajnji rezultat daje rangiranu listu varijanti za alternativno napajanje i plan potrebnih prekidačkih operacija za izvođenje tih varijanti.

U radu [[26]] predstavljena je metodologija za izradu optimalno dugoročnog rasporeda za održavanje distributivnih mreža. Metodologija je zasnovana na pristupu upravljanja rizikom, koja obezbeđuje realno modelovanje ispada komponenti kao i estimaciju očekivanih posledica. Predložena metodologija je testirana na realnoj distributivnoj mreži. Rezultati su pokazali da očekivana cena, kao i rizici, održavanja distributivne mreže može biti smanjena.

Rad [[27]] predstavlja proširenje standarda za modelovanje podataka elektroenergetskih sistema (*eng. Common Information Model - CIM*) sa katalogima topologije, tj. katalogima polja, za distributivne mreže. Ovo proširenje je realizovano definisanjem dodatnog skupa podataka za kataloške kontejnere opreme. Prošireni *CIM* je testiran na realnoj mreži. Sudeći po rezultatima, uključivanje kataloga polja može značajno unaprediti performanse rešenja zasnovanog na *CIM*.

U radu [[28]] je opisana procedura za restauraciju napajanja na bazi fazi logike i upravljanja rizikom. Fazi logika omogućuje realno modelovanje neizvesnosti u poznavanju opterećenja mreže i efekta naglog skoka opterećenja nakon povratka napajanja, dok upravljanje rizikom obezbeđuje visoki kvalitet donošenja odluka u procesu restauracije u tako neizvesnom okruženju.

2.3. Primene *Cloud* računarstva u elektroenergetici

Postoji veliki broj radova koji opisuju moguće načine povezivanja oblasti *Cloud* računarstva i sistema pametnih mreža. Radovi [[29]]-[[31]] opisuju upravljanje informacijama (*eng. Information Management*) u sistemima pametnih mreža. U radu [[29]] prikazana je platforma za optimizaciju upotrebe resursa i na osnovu toga smanjenje cene razvoja i održavanja sistema pametnih mreža koristeći *Cloud* tehnologije. Rad [[30]] opisuje primenu *Cloud* pristupa razvoju softvera u pametnim mrežama sa posebnim osvrtom na upravljanje informacijama i predložen je pristup za modelovanje informacionog sistema. Principi razvoja *Cloud* zasnovanog informacionog sistema naredne generacije su predstavljeni u radu [[31]]. U tom radu

su opisana i ograničenja postojećih informacionih sistema, a predstavljen je i slojeviti *Cloud* zasnovani informacioni sistem za upravljanje sistemima za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije.

Radovi koji opisuju upravljanje *SG* sistemima, upravljanje u realnom vremenu, računarsku bezbednost i analitička merenja su dati u [[32]]-[[38]]. U radu [[32]] opisan je *Cloud* zasnovan *SG* sistem zasnovan na platformi koja vrši upravljanje potrošnjom energije koristeći servisni pristup. Na ovaj način dobija se takozvana zelena energija na dva načina – postiže se niža cena energije i integrišu se obnovljivi izvori energije. U radu [[33]] opisan je virtualizovani *SCADA* sistem razvijen u *Cloud* okruženju. U tu svrhu je razvijen sistem za pristup bilo kom tipu informacija koje su generisale različite *SG* komponente upotrebom zajedničke *Cloud* infrastrukture čime je povećana dostupnost informacija.

Poseban naglasak na bezbednosne mehanizme i načine da se poveća poverljivost podataka i operativna privatnost rada pri pristupu podacima u *Cloud* okruženju je opisana u radu [[34]]. Istraživanje u kom je proučavano sedam softverskih platformi zasnovanih na *Cloud* pristupu razvoju softvera dovelo je do sledećih zahteva za: odgovornost, autorizaciju, dostupnost, privatnost, kontrolu prava pristupa, autentičnost, integritet i poverljivost. U radu [[35]] posebna pažnja posvećena je opfuskaciji bezbednosno osetljivih podataka. U radu [[36]] opisana je implementacija platforme za simulaciju rada *SG* Sistema u *Cloud* okruženju, uključujući analizu i optimizaciju troškova. *Cloud* orijentisani sistem za analitiku zasnovanu na podacima koji služe za dinamičku optimizaciju potrošnje energije je opisan u radu [[37]]. Sistem za kontrolu uređaja u *SG* sistemima zasnovan na *Cloud* pristupu je predstavljen u radu [[38]]. Navedeni radovi nude idejni opis sistema aplikacija za rad u realnom vremenu, ali su prikazani samo simulacioni ili eksperimentalni sistemi sa malom količinom podataka koji se obrađuju.

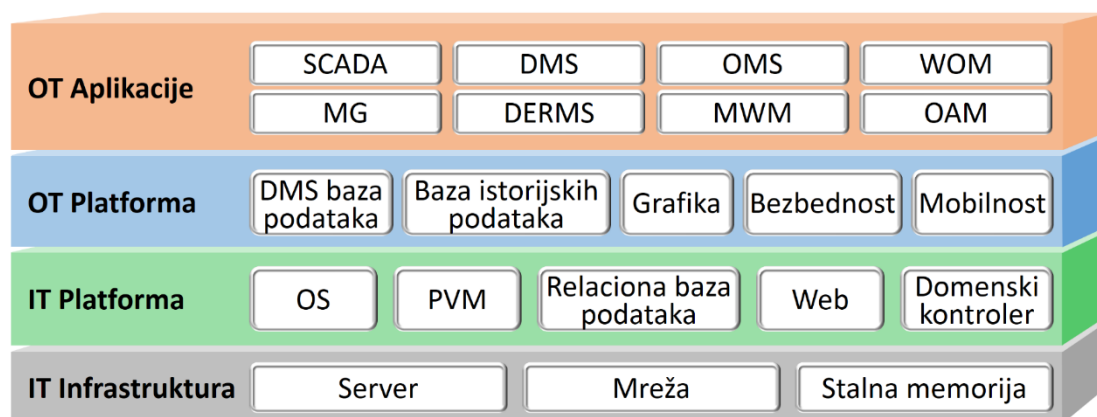
Primena efikasnih bezbednosnih mehanizama za zaštitu informacionih sistema je od suštinske važnosti za pouzdan, efikasan i bezbedan rad savremenih elektroenergetskih sistema, a implementacija jakih i robusnih kontrola pristupa prilagođenih složenim zahtevima savremenih elektroenergetskih sistema je od suštinske važnosti za dostizanje adekvatnog nivoa informacione bezbednosti. Naime, model kontrole pristupa zasnovan na korisničkim ulogama (*eng. Role-Based Access Control – RBAC*) je jedan od najčešće korišćenih modela za kontrolu pristupa u sistemima koje karakteriše veliki broj korisnika i resursa koje je potrebno zaštititi. Centralni deo *RBAC* modela predstavlja koncept uloge oko koje su postavljena prava pristupa. Ulogama se dodeljuju privilegije, a korisnicima se dodeljuju uloge. Međutim, sa razvojem heterogenih, distribuiranih (*eng. pervasive*) računarskih sistema sve češće se javlja potreba da neki drugi faktori koji nisu deo korisničkog identiteta (npr. vreme

pristupa sistemu, lokacija sa koje se pristupa sistemu, itd.) utiču na odluke o pristupu resursima. Shodno tome, u radu [[39]] je izvršena sistematizacija zahteva za kontrolu pristupa postavljenih od strane savremenih elektroenergetskih kompanija, kao i zahteva propisanih tehničkim standardima u oblasti informacione bezbednosti za *SG*. Zatim je dat predlog unapređenja standardnog *RBAC* modela tako da odgovori aktuelnim zahtevima u elektroenergetskoj industriji, i tako omogući ne samo zaštitu od neovlašćenog pristupa, već i smanji rizike od nenamernih grešaka validnih korisnika. U istom radu je postavljena softverska arhitektura odgovarajućeg sistema za kontrolu pristupa, čija je prototipska implementacija zatim integrisana u simuliranom *SG* okruženju koje je razvijeno u skladu sa standardnim *IEC-62443* bezbednosnim modelom za *SG* [[20]].

Analizom postojećih rezultata može se utvrditi da postoji veliki potencijal za upotrebu *Cloud* baziranih sistema u modernim sistemima pametnih mreža. Postoji veliki broj inicijativa koje opisuju samo mali podskup potrebnih funkcionalnosti, ali ne postoji sveobuhvatno *ADMS* rešenje koje je bazirano na *Cloud*-u, naročito ne rešenja koja imaju mogućnost primene u produkcionim uslovima. U ovoj disertaciji je predstavljeno sveobuhvatno *ADMS* rešenje, sa produkcionim karakteristikama (uključujući aplikacije za upravljanje u realnom vremenu kao i aplikacije za rad u autonomnom režimu sa povremenim poravnanjem) zasnovano na zajedničkoj *OT* platformi, implementirano na *Cloud* infrastrukturi.

3. NAPREDNI DISTRIBUTIVNI MENADŽMENT SISTEM

Ključna prednost *Cloud ADMS* rešenja, predloženog u ovoj doktorskoj disertaciji, je odabir softverskog rešenja zasnovanog na zajedničkoj *OT* platformi koja obezbeđuje laku integraciju različitih funkcionalnosti, pojednostavljenu instalaciju, smeštanje na računare i održavanje sistema.



Slika 1: ADMS softverska arhitektura

Slika 1 predstavlja posmatranu *ADMS* arhitekturu, korišćenu kao osnovu za ovo istraživanje, koja se sastoji iz četiri nivoa: 1) *IT* infrastruktura 2) *IT* platforma 3) *OT* platforma i 4) *OT* Aplikacije, koje su opisane u daljem tekstu.

3.1. IT Infrastruktura

IT infrastruktura obuhvata servere, komunikacionu opremu i stalnu memoriju.

Server, kao termin, se često koristi kao naziv kako za računarske programe, tako i za same uređaje na kojima se oni izvršavaju. Kada se server posmatra kao infrastrukturna komponenta onda se pod pojmom server najčešće podrazumeva fizički uređaj – računar, sa odgovarajućim resursima (procesorima, memorijom, mrežnim uređajima, stalnom memorijom) dovoljnim da opsluži veliki broj različitih operacija zahtevanih od strane aplikacija. Najčešće se na serverskim uređajima pokreću specijalizovane verzije operativnih sistema, sposobne da opsluže veliki broj klijenata istovremeno. U današnje vreme serveri često predstavljaju hardversku platformu na kojoj se aplikacije direktno smeštaju ili se procesom virtualizacije pokreću više instanci virtualnih mašina, koje takođe mogu imati ulogu servera u posmatranom okruženju. U ovoj doktorskoj disertaciji server podrazumeva fizičku računarsku komponentu.

Računarska mreža povezuje računare i druge mrežne uređaje (štampače, skenere, specijalizovane periferije, mrežne rutere i sl). Povezivanje se ostvaruje putem komunikacionih kanala koji podrazumevaju postojanje medija kroz koji se veza

ostvaruje (žično, optičkim kablom, bežično), kao i komunikacionih protokola koji definišu način komunikacije, adresiranja i formatiranja podataka koji se prenose. Danas je skoro nemoguće zamisliti funkcionisanje složenih softverskih rešenja bez oslanjanja na povezivanje sa drugim sistemima putem računarskih mreža. Postoje različite kategorizacije mreža na osnovu njihovih karakteristika. Jedna od često korišćenih kategorizacija je po veličini oblasti koju mreža pokriva, gde se grubo mogu uočiti lokalne mreže, mreže šireg područja, mreže u većim konurbacijama, spojne mreže i kao globalna mreža Internet. Osnovna uloga mreže je da obezbedi komunikaciju i razmenu podataka između različitih računarskih sistema, kao i, najčešće dobro kontrolisan pristup deljenim resursima (čime se povećava ekonomičnost *IT* infrastrukture jer se skuplji, a relativno slabo korišćeni resursi mogu staviti na raspolaganje većem broju korisnika).

Stalne memorije (*eng. Storage*) predstavljaju uređaje za trajno skladištenje i čuvanje podataka. Jedna od ključnih karakteristika stalnih memorija je njihov po pravilu veliki kapacitet (u poređenju sa radnom memorijom računara), te sposobnost dugotrajnog čuvanja podataka bez neophodnosti napajanja. Kao stalne memorije u današnjim računarskim sistemima se po pravilu koriste *Hard Disk Drive* i u novije vreme *Solid State Drive* diskovi. Za velike poslovne sisteme pojedinačni čvrsti diskovi najčešće ne zadovoljavaju neophodne zahteve u pogledu kapaciteta i performansi, pa se u ovakvim sistemima često diskovi povezuju putem specijalizovanih uređaja u sisteme posebne namene.

3.2. *IT* Platforma

IT platforma obuhvata skup softverskih paketa koji se sastoji iz: Operativnog Sistema (*eng. Operating System - OS*), procesne virtualne mašine (*eng. Runtime*), relacione baze podataka (*eng. SQL Database – SQL*), Web servera i domenskog kontrolera.

Operativni sistem predstavlja softverski sloj neophodan za korišćenje osnovnih računarskih funkcionalnosti i obuhvata, ali nije ograničen na: upravljanje procesorskim zadacima, operativnom memorijom, rukovanje ulazno/izlaznim jedinicama, grafičko okruženje i omogućuje paralelni rad više različitih aplikacija i korisnika.

Procesna virtualna mašina predstavlja softversko okruženje iznad operativnog sistema za izvršavanje aplikacija koje apstrahuju računarsku arhitekturu, funkcionalnosti operativnog sistema (rukovanje memorijom, nitima, programski interfejs). Ovaj sloj predstavlja virtualnu mašinu koja programima pisanim u jezicima podržanim na datoj platformi pruža zajedničku platformu za izvršavanje. Ključna

komponenta ovog okruženja je komponenta za kasno prevođenje, koja u toku izvršavanja prevodi međukod u mašinski jezik računarskog sistema na kome je međukod instaliran.

Web server predstavlja računarski sistem čija osnovna namena je da učini web sajtove i aplikacije zasnovane na web tehnologijama dostupne klijentima putem interneta ili intraneta. Tipično se za web servere obezbeđuju mrežne konekcije velikog propusnog opsega, kako bi bili u stanju opslužiti veliki broj klijentskih zahteva u kratkom vremenskom periodu. Uobičajeno je da jedan web server opslužuje više web sajtova i/ili web aplikacija. Inicijalno, web serveri su opsluživali statičke web sajtove kod kojih se obrada klijentskih zahteva svodila na isporučivanje statičkih *HTML* stranica. U današnje vreme, većina web sajtova su složene web aplikacije kod kojih se sadržaj za klijenta generiše dinamički, na osnovu obrade njegovog zahteva, pri čemu se podaci koji se isporučuju klijentu mogu prikupljati iz različitih izvora (fajl sistem, baze podataka, multimedijalni sadržaji na zahtev itd). Moderni web serveri moraju stoga pružati podršku i za izvršavanje programskog koda web aplikacija. Najčešće se web aplikacije danas razvijaju u programskim jezicima *C# (.NET platforma)*, *Java*, *PHP*, *Python*.

Sistemi za upravljanje relacionim bazama podataka, obezbeđuju servise sloja podataka u modernim višeslojnim aplikacijama. Ovi servisi omogućavaju efikasan pristup, ažuriranje, pretraživanje i čuvanje podataka putem dobro definisanog i standardizovanog upitnog jezika (*eng. Structured Query Language – SQL*). Serveri baza podataka omogućavaju da se na jednom serveru čuva jedna ili više baza podataka (kolekcije šema, tabela, pogleda (*eng. views*), uskladištenih procedura (*eng. stored procedures*) i drugih objekata koji u celini čine jednu bazu podataka). Vrlo bitan aspekt baza podataka je da omoguće transakcioni režim rada tj. da obezbede da se manipulacija podacima može obaviti u skladu sa *Atomičnošću*, *Konzistentnošću*, *Izolacijom* i *Izdržljivošću* (*eng. Atomicity, Consistency, Isolation and Durability - ACID*) principima.

Domenski kontroler (*eng. Domain Controller – DC*) je odgovoran za rukovanje domenom, korisničkim nalogima, grupama korisničkih naloga, korisničku autorizaciju i autentifikaciju, vremensku sinhronizaciju i rukovanje grupnim polisama koje olakšavaju učvršćivanje bezbednosti u rešenju. Mogućnost organizovanja sistema u više domena i bezbednosnih zona omogućuje strategiju višeslojne zaštite sistema.

3.3. *OT* Platforma

OT platforma predstavlja sloj softverskih biblioteka zajedničkih za *OT* aplikacije i obuhvata: *DMS* bazu podataka, bazu istorijskih podataka, podršku za

korisnički interfejs, podršku za bezbednost, podršku za mobilne aplikacije i druge zajedničke pakete korišćene u *OT* aplikacijama.

DMS baza podataka predstavlja skladište podataka neophodnih za upravljanje elektrodistributivnom mrežom - statičkih podataka modela mreže, dinamičkih podataka, i grafičkih podataka. Pruža podršku i za rukovanje životnim ciklusom *DMS* modela, arhiviranje podataka i razne standardizovane interfejse za pristup od strane spoljnih sistema.

Podrška za korisnički interfejs omogućuje grafički, tabelarni i formski prikaz stanja sistema koji su modularni i fleksibilni za prilagođenje različitim elektrodistributivnim preduzećima. Zasnovan je na tehnologiji za pisanje modularnih aplikacija i pruža podršku za ubrzanje na računarskom nivou.

Podrška za bezbednost pruža mehanizam autorizacije zasnovane na *RBAC* modelu koji je lako prilagodljiv različitim podelama korisničkih uloga u elektrodistributivnim preduzećima. Arhitektura platforme podržava rad u više bezbednosnih zona uključujući i adekvatan mehanizam replikacije podataka.

Podrška za mobilne aplikacije obezbeđuje pomoćne biblioteke za pripremu iscrtavanja grafičkog prikaza za mobilne uređaje i podršku za rad u odspojenom režimu sa povremenom sinhronizacijom.

3.4. *OT* Aplikacije

OT aplikacije predstavljaju skup aplikativnih paketa za upravljanje elektrodistributivnim mrežama koji obuhvata razne elektroenergetske proračune i poslovnu logiku elektrodistributivnih preduzeća. Potrebno je da imaju visok nivo prilagodljivosti različitim korisnicima u različitim eksploacionim modelima koji se može razlikovati od regiona do regiona [[40]].

3.4.1. *SCADA*

SCADA sistem predstavlja sistem odgovoran za komunikaciju sa daljinskim telemetrisanim uređajima (eng. *Remote Terminal Unit - RTU*) i inteligentnim elektronskim uređajima (eng. *Intelligent Electronic Device - IED*). *SCADA* ostvaruje komunikacionu vezu sa uređajima u polju i proziva ih u svrhe dobavljanja podataka u realnom vremenu. Dodatno, prikupljeni podaci se obrađuju u dva prolaza, osnovni i napredni. Osnovna obrada podataka podrazumeva konverziju neobrađenih vrednosti u inženjerske jedinice kao i proveru ispravnosti primljenih podataka. Napredna obrada podataka uključuje alarmiranje ukoliko vrednost izlazi izvan operativnog opsega za određeni uređaj i naponski nivo. *SCADA* takođe obezbeđuje mogućnost upravljanja

elektroenergetskim procesom, bilo da upravljanje ručno sprovodi operater iz kontrolnog centra ili *DMS* aplikativni modul.

3.4.2. *DMS*

DMS predstavlja sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom, koji kombinuje statičke podatke preuzete iz *GIS-a*, dinamičke podatke prikupljene od *SCADA* sistema i uključuje proračun tokova snaga, estimaciju stanja korišćenu pri rukovanju mrežom, optimalno operativno planiranje, uzročno-posledične analize i simulacije. *DMS* aplikacije pružaju poboljšan uvid u stanje mreže, čak i u delovima mreže koji nisu direktno nadgledani, što podiže svest o stanju mreže i pomaže pri odlučivanju. Uz to, *DMS* aplikacije pružaju neprestanu optimizaciju stanja mreže, analize kvarova i relejne zaštite u realnom vremenu. Pametne aplikacije za prognozu stanja daju predloge potrebnih manipulacija, što omogućuje preventivno upravljanje mrežom sa ciljem prevazilaženja potencijalnih problema pre nego što nastanu. *DMS* aplikacije su dostupne u realnom vremenu i u vidu simulacije, što nudi veliki broj uzročno-posledičnih analiza u svakodnevnom radu. Mnogobrojne prednosti su omogućene korišćenjem *DMS* aplikacija:

- Povećava se zarada kompanije optimizacijom tehničkih gubitaka i garantuje kvalitet energije isporučene krajnjim korisnicima.
- Izbegavaju restrikcije električne energije u vanrednim uslovima korišćenjem pametnih zahteva za smanjenje potrošnje.
- Moguće je produžiti radni vek opreme optimizacijom upravljanja, kao i minimizovati ulaganja u distributivnu mrežu optimalnim planiranjem razvoja mreže.

DMS aplikacije su bazirane na podacima u realnom vremenu, kao i na istorijskim podacima, koji su od ključne važnosti za preciznost predstavljanja i modelovanja mreže. Sledeće *DMS* aplikacije su razvijene i u upotrebi:

- Aplikacije za nadzor:
 - Tokovi snaga
 - Estimacija stanja
- Optimizacione aplikacije:
 - Kontrola aktivne i reaktivne snage
 - Rekonfiguracija mreže
- Operativno planiranje:
 - Prognoza opterećenja u narednih par sati, kratkoročna i srednjeročna prognoza

- Skaliranje opterećenja
- Analitičke aplikacije:
 - Gubici energije
 - Proračuni kvarova i analiza relejne zaštite
 - Analiza harmonika i analiza pouzdanosti
- Aplikacije za razvojno planiranje:
 - Konekcije potrošača
 - Automatizacija mreže
 - Optimalno postavljanje regulatora napona i optimalno postavljanje kondenzatora u mreži

3.4.3. OMS

OMS predstavlja sistem koji obezbeđuje efikasni menadžment planiranih i neplaniranih ispada tokom regularnih eksploatacionih uslova kao i tokom vanrednih uslova kao što su vremenske neprilike. Njegov rad zasnovan je na daljinski kontrolisanim i nekontrolisanim tačkama u polju i obuhvata detekciju, analizu i upravljanje. *OMS* sadrži i deo koji obezbeđuje optimalno i brzo lociranje i izolaciju kvara, kao i vraćanje napajanja (*eng. Fault Location, Isolation and Supply Restoration - FLISR*) većini potrošača na izvodima sa dovoljno opreme povezane sa *SCADA* sistemom. *OMS* je sistem odgovoran i za preuzimanje i obradu poziva potrošačima i upravljanje ekipama na terenu uz optimalno raspoređivanje ekipa. Kao rešenje, *OMS* obezbeđuje procenjeno vreme za restauraciju, upravljanje prioritizacijom, kao i upravljanje mrežom u uslovima oluje i procene šteta nastale tokom oluja. Korisnicima se nude brojne prednosti kao što je poboljšanje pouzdanosti mreže i zadovoljstva korisnika, kao i smanjenje vremena ispada i optimalno upravljanje opremom [[41], [42]].

3.4.4. WOM

Sistem za upravljanje radnim nalogima (*eng. Work Order Management - WOM*) predstavlja sistem za rukovanje procedurama i svim aktivnostima u vezi planiranih radova u elektrodistributivnoj mreži, a koje obuhvataju:

- izvršenje prekidačkih akcija u elektrodistributivnoj mreži za svrhu održavanja mrežne rekonfiguracije i popravke ispada,
- rukovanje privremenim elementima (*eng. temporary elements*): privremene spojnice (*eng. temporary jumper*), prekide (*eng. cut*), prekidače (*eng.*

switch), uzemljenja (*eng. grounding*), generatore (*eng. generators*), mobilne objekte (*eng. mobile objects*),

- izdavanje instrukcija posadama za prekidačke promene u polju i
- prateće validacije koje obezbeđuju bezbedan rad ekipe u polju.

Navedene procedure se implementiraju kroz skup dokumenata: zahtevi za radovima, planovi prekidačkih promena, bezbednosni dokumenti.

3.4.5. *MG*

Aplikativni paket za menadžment mikromreža upravlja sistemom povezanih potrošača i distribuiranih izvora energije u okviru jasno definisanih granica, koji se ponašaju kao jedinstven upravljivi entitet u odnosu na glavnu mrežu. Ključna funkcionalnost *MG* aplikacija je da podrži rad mikromreže u dva osnovna režima, povezanom i izolovanom režimu, uvažavajući da njihovi ciljevi u ovim režimima mogu biti različiti. Osnovni cilj u povezanom režimu rada je ekonomska optimizacija i maksimizacija profita, dok je osnovni cilj u izolovanom režimu rada povećanje pouzdanosti napajanja kritičnih potrošača. Mikromreže donose mnoge doprinose i dobiti u menadžmentu elektroenergetskim sistemima i to su: povećanje pouzdanosti napajanja, unapređenje očuvanja životne sredine, povećanje prihoda vlasnika distribuiranih energetske izvora (*eng. Distributed Energy Resources - DER*), povećanje diverziteta izvora električne energije, povećanje stabilnosti glavne mreže kao i smanjivanje i odlaganje potreba za kapitalnim investicijama [[43], [44]].

3.4.6. *DERMS*

DERMS predstavlja sistem koji objedinjuje i upravlja radom distribuiranih energetske resursa disperzovanih širom mreže. *DERMS* je zadužen za agregaciju velikog broja disperzovanih distribuiranih energetske resursa u različite grupe resursa koristeći različite kriterijume, čime se omogućuje postizanje optimalnog stanja mreže. Sistem je u mogućnosti da servisira milione individualnih distribuiranih energetske resursa i da ih prezentuje operateru sistema kao manji i upravljiviji broj virtualnih resursa. Pored toga, *DERMS* vodi računa o kompleksnom i granularnom skupu individualnih distribuiranih energetske resursa ukupnjujući ih u jednostavne mrežno-orijentisane servise koji se sastoje od potreba *DMS* sistema. Ove akcije *DERMS* izvodi u cilju upravljanja mrežom uz minimalne troškove i maksimalni kvalitet energije [[45], [46]]. Sledeći tipovi *DER*-ova se uzimaju u razmatranje:

- 1) Distribuirani generatori: a) Generatori obnovljivih izvora energije (solarni generatori i vetrogeneratori), b) Konvencionalni generatori (koriste gas i naftu)
- 2) Skladišta energije

- 3) Manje jedinice iza pametnog brojila (npr. solarne ploče na domaćinstvima)
- 4) Električna vozila

3.4.7. Sistem za upravljanje posadama na terenu

Sistem za upravljanje posadama na terenu (*eng. Mobile Workforce Management - MWM*) obezbeđuje potpunu, mobilnu implementaciju upravljanja elektrodistribucijama i prikaz stanja mreže i uslova radnicima na terenu u realnom vremenu putem mobilnih uređaja. Najvažniji deo *MWM*-a je *korisnička* web aplikacija specijalno dizajnirana za radnike na terenu, koji mogu da izvrše sve bitne operacije na terenu. Ona obezbeđuje pouzdaniju i organizovaniju komunikaciju između ekipe na terenu i kontrolnog centra i pruža sledeće funkcionalnosti: Pregled stanja mreže u realnom vremenu, uključujući topologiju, statuse i merenja svih *SCADA* i ručno upravljanih tačaka; praćenje putanje napajanja od ili ka izvoru ili prema specifičnim kriterijumima; Postavljanje oznaka, poruka i privremenih elemenata; Zajednički rad sa kontrolnim centrom u vezi sa upravljanjem svim događajima, predviđenim i potvrđenim, vezanim za ispad ili ne, kao i prilikom izvršenja plana rada [[47]].

3.4.8. OAM

Sistem za operativno upravljanje imovinom (*eng. Operational Asset Management- OAM*) je sistem za modelovanje elemenata elektrodistributivne mreže, kao i za praćenje njihovog statusa i potreba za zamenu i održavanje. Od interesa je praćenje događaja koji su relevantni za životni vek elementa, kao i njegovih eksploatacionih uslova (npr. broj prorada zaštite sa iznosom struje kratkog spoja, broj operacija uređajem, vreme i trajanje eventualnih preopterećenja i drugo). Sistem omogućuje pregled izveštaja o tekućem stanju opreme, kao i poređenje sa preporukama o održavanju radi kreiranja plana održavanja. Integracija sa ostalim komponentama *ADMS*-a omogućuje efikasan proces za kreiranja radnih naloga održavanja i odgovarajućih prekidačkih akcija na mreži kako bi se obezbedili uslovi za bezbedan rad na terenu uzimajući u obzir privremenu konfiguraciju mreže i minimalan uticaj na potrošače [[48]].

4. VIRTUALIZACIJA I *CLOUD* RAČUNARSTVO

Virtualizacijom računarskih komponenti, i transformacijom *IT* infrastruktura u softverski definisano okruženje u kojem se računarski resursi mogu rezervirati preko programse podrške i koristiti po potrebi kao servis, nastaje *Cloud* računarstvo. U ovom poglavlju date su teorijske osnove virtualizacije, *Cloud* računarstva i *Cloud* servisa.

4.1. Virtualizacija

Računarski koncept virtualizacije poznat je još iz operativnih sistema koji u svojim jezgrima imaju komponentu za rukovanje memorijom i virtualnim memorijskim stranicama. Danas virtualizacija predstavlja jedan od glavnih stubova razvoja modernih distribuiranih računarskih rešenja za upravljanje velikim sistemima. Virtualizacija predstavlja softverski sloj koji oponaša rad fizičkih računarskih komponenti i omogućuje segmentaciju velikih računarskih sistema, pokretanje više softverski-simuliranih izolovanih virtualnih mašina (koje se mogu lako stvarati, raspoređivati, proširivati i odlagati prema potrebama korisnika) i operativnih sistema nad jednim deljenim fizičkim računarskim sistemom. Time postiže značajne uštede u računarskim resursima pre svega zato što se potrebe korisnika menjaju u vremenu tako da je na većem broju korisnika moguće usrednjiti i multipleksirati korišćenje računarskih resursa. Pored toga, virtualizacija, kao softversko okruženje, dostupna je i kontrolabilna preko skriptnih jezika i raznih aplikativnih interfejsa koji omogućuju veliku fleksibilnost u radu i automatizaciju. Ona olakšava kreiranje, raspoređivanje, proširivanje i odlaganje računarskih resursa i omogućuje lakše održavanje različitih verzija softvera kao i kontrolu ispravnosti rada komponenti.

U početku upotreba virtualizacije je bila mala jer su prve verzije virtualizacionih platformi unosile značajne dodatne troškove i umanjivale iskorišćenost računarskih resursa, dok su i ukupni računarski resursi dostupni u jednom opštenamenskom računarskom sistemu bili ograničeni što je posebno imalo uticaj na računarske sisteme visokih performansi (eng. *High Performance Computing – HPC*). Nove verzije ovih platformi su optimizovane tako da uvode minimalno dodatno opterećenje na računarske sisteme, a i same računarske komponente su logički projektovane i dodatno optimizovane za rad na virtualizacionim platformama. Računarska industrija je napredovala i po pitanju kapaciteta računarskih resursa, danas postoje računari čiji resursni kapaciteti su pojedinačno veliki kao nekadašnje manje farme računara. Zbog svega toga većina modernih softverskih sistema u velikim infrastrukturnim organizacijama se izvršavaju na virtualizovanim operativnim sistemima. Virtualizacija se može primeniti nad konkretnom logički projektovanom komponentom ili se za potrebe virtualizacije može isprojektovati zamišljena komponenta. Takođe prilikom

konfiguracije virtualizacije može se iskoristiti dodatna softverska optimizacija koja će dati bolje performanse, pri čemu njeno ponašanje može odstupiti od logički projektovanog čipa. U savremenoj eri računarstva virtualizacija se primenjuje na procesore, operativnu memoriju, diskove, mrežne komponente, grafičke procesore itd.

Moderni operativni sistemi podržavaju i kontejnerske tehnologije koje omogućuju softversku izolaciju aplikativnog procesa na nivou jezgra operativnog sistema što predstavlja novu generaciju softverske izolacije i dodatno umanjuje dodatne troškove izolacije. Prilikom migracije softverskih sistema u virtualna okruženja mogu se posebno migrirati serverske računarske komponente, klijentske računarske komponente i mrežne komponente. Prilikom migracija softverskih rešenja visokih performansi potrebno je posebnu pažnju posvetiti rukovanju dodatnim troškovima performansi kako bi se osiguralo da svaki funkcionalni blok u svakom momentu ima obezbeđeno dovoljno računarskih resursa kako bi obavio svoj zadatak (u slučaju *ADMS*, zadatak sa kritičnom misijom). Pored rukovanja dodatnim troškovima, posebnu pažnju treba pridati i bezbednosnim aspektima softverskog rešenja. U ovoj doktorskoj disertaciji fokus istraživanja je na migraciji serverskih računarskih komponenti *ADMS* rešenja u virtualno okruženje.

4.2. *Cloud* računarstvo

Uporedno sa razvojem računarskih sistema, rastom njihovog fizičkog kapaciteta, i sve efikasnijih virtualizacionih tehnologija, razvile su se i međuračunarske komunikacije koje postižu sve veće brzine protoka, a istovremeno su i ekonomski sve pristupačnije. Ovakav tehnološki napredak omogućio je razvoj novog koncepta *Cloud* računarstva, u kojem se računarski resursi i njima pridruženi softverski paketi koncentrisano smeštaju u centre podataka, iz kojih im se može daljinski pristupiti preko računarskih mreža. *Cloud* kapaciteti se mogu po potrebi rezervisati i oslobodati, sa ciljem da se koriste kao servis i naplaćuju samo onoliko koliko su zaista korišćeni.

U *Cloud* računarstvu razlikuju se *Cloud* tehnologije i *Cloud* servisi koji se dobijaju kada se na te *Cloud* tehnologije dodaju ljudi, servisni procesi i funkcije koje te servise proizvode.

4.2.1. *Cloud* tehnologije

Cloud tehnologije se dele na: 1) Infrastrukturne, 2) Platformske i 3) Aplikativne. Pored osnovnih *Cloud* tehnologija neophodni su i upravljački alati koji omogućuju lako i efikasno upravljanje računarskim i softverskim sistemima (eng. *Management Tools - MT*).

Infrastrukturne *Cloud* tehnologije obuhvataju *IT* infrastrukturu (računare, komunikacionu opremu i stalnu memoriju) koja odgovara ranije navedenim opisima (v. *odjeljak 3.1*), virtualizacione tehnologije koje omogućuju virtualizaciju ovih komponenti i softverski definisano okruženje koje omogućuje lako stvaranje, raspoređivanje, proširivanje i odlaganje infrastrukturnih resursa prema potrebama korisnika.

Termin *Cloud* platforma je veoma zastupljen i u zavisnosti od konteksta može podrazumevati različita značenja. U ovoj doktorskoj disertaciji podrazumevano je da *Cloud* platforma predstavlja tehnologiju višeg nivoa koja apstrahuje infrastrukturne slojeve i omogućuje korisnicima da se fokusiraju na razvoj i upravljanje svojih aplikacija bez da imaju ekspertizu o određenim pojedinostima *IT* infrastrukture. Osnovni oblik *Cloud* platforme odgovara ranije opisanim tehnologijama (v. *odjeljak 3.2*) i obuhvata a) Operativni Sistem, b) Procesnu virtualnu mašinu c) relacioni server baze podataka, kontroler domena, dok prošireni oblik *Cloud* platforme predstavlja međusloj tehnologija višeg nivoa koji apstrahuje *IT* infrastrukturu, omogućuje efikasnu proizvodnju distribuiranih i visoko skalabilnih (elastičnih) softverskih paketa za:

- 1) Upravljanje strukturama podataka kao što su: binarni podaci, relacione tabele, nerelacione tabele, redovi, serijski podaci, skladišta za isporuku podataka udaljenim korisnicima itd.
- 2) Implementaciju komunikacije distribuiranih aplikacija (adresiranje mrežnog prostora i rukovanje mrežnim imenima, raspoređivanje mrežnog saobraćaja, kontrole mrežnog pristupa itd.).
- 3) Softverski definisano smeštanje aplikativnih paketa.
- 4) Bezbednosne mehanizme: višestepena autentifikacija, upravljanje poverljivim podacima nadzor događaja koji se odnose na bezbednost, itd.
- 5) Automatizaciju i orkestraciju upravljanja događajima u sistemu
- 6) Prikupljanje dijagnostičkih podataka iz aplikacije.

Aplikativne *Cloud* tehnologije obuhvataju raznolike softverske pakete koje su sposobne da funkcionišu u *Cloud* okruženju. Postoje razne klasifikacije i arhitekturni obrasci u zavisnosti od stepena integracije aplikacije u elastično *Cloud* okruženje. U okviru ove doktorske disertacije stepen migracije klasifikuje se na sledeći način:

- 1) Mogu biti migrirani bez izmena na *Cloud* infrastrukturu tj. bez svesti o tome da se nalaze u virtualnom elastičnom okruženju. U ovom slučaju okruženje mora biti podešeno na specifičan način kako ne bi „iznenadilo aplikaciju“ i dovelo do narušavanja zahteva aplikativnog rešenja.

- 2) Delimično prilagođeni, što podrazumeva visoku pokrivenost tokova izvršavanja sa meračima ključnih parametara, osnovnu integraciju sa alatima za nadzor sistema, arhiviranje, orkestraciju, kontinualnu isporuku rešenja itd.
- 3) Redizajnirani za *Cloud*, tj. usklađeni sa arhitekturnim *Cloud* obrascima, što omogućuje korišćenje ugrađenih prednosti *Cloud* okruženja (npr. uobičajnu platformsku orkestraciju).

Za kvalitetnu isporuku servisa zasnovanim na *Cloud* tehnologijama neophodni su i *MT* koji obuhvataju:

- 1) Nadzor rada infrastrukturnih, platformskih i aplikativnih tehnologija,
- 2) Upravljanje konfiguracijom,
- 3) Automatizaciju i orkestraciju upravljanja događajima,
- 4) Korisnički Web interfejs za pristup softverski definisanim resursima,
- 5) Upravljanje arhiviranjem,
- 6) Upravljanje administratorskim nalogima,
- 7) Skladištenje i obradu događaja tokom rada sistema,
- 8) Upravljanje imovinom i finansijama.

Sa aspekta vlasništva *Cloud* sistema postoji više mogućih pristupa. Mali korisnici, koji nemaju postojeći sistem, a ni potrebne resurse da razviju svoje rešenje, se najčešće opredeljuju za javni (*eng. Public*) *Cloud*. Ovaj pristup omogućava brz razvoj rešenja i smanjuje inicijalna ulaganja ali se podaci nalaze van kompanije što unosi nove izazove sa bezbednošću i privatnošću podataka.

Veliki korisnici, čije poslovanje opravdava (već imaju u vlasništvu računarske i ljudske resurse), se najčešće opredeljuju za privatni (*eng. private*) *Cloud*. Na ovaj način podaci i servisi ostaju u kompaniji, ali je cena održavanja velika.

Kompromisni pristup predstavljaju hibridna (*hybrid*) *Cloud* rešenja u kojima se deo podataka i obrade koji je najkritičniji za poslovanje kompanije smešta u privatni *Cloud*, a deo koji nije kritičan se izmešta van prostorija kompanije u javni *Cloud*, čime se dobija najbolje od oba rešenja.

4.2.2. *Cloud* Servisi

Pojam upravljanja informatičkim uslugama (*eng. Information Technology Service Management – ITSM*) je stariji od *Cloud* računarstva. U mnogim preduzećima još od ranije postoje interne *IT* organizacije koje pružaju razne tehnološke servise poslovnim korisnicima unutar svoje kompanije (upravljanje korisničkim računima, održavanje računarske opreme, operativni nadzor i upravljanje *IT* sistema neophodnih

za poslovanje itd.). U ovoj doktorskoj disertaciji servisi se dele na tehnološke ili netehnološke. Tehnološki servisi mogu biti *Cloud* servisi ukoliko se zasnivaju na *Cloud* tehnologijama (v. odeljak 4.2.1). Na primer jedan aplikativni paket može tehnološki biti implementiran i na tradicionalnoj (fizičkom) *IT* infrastrukturi ili *Cloud* okruženju.

Servisni pristup isporuci softvera podrazumeva da klijent dobija na korišćenje usluge po predefinisanim i ugovorenim uslovima, a da pri tome ne snosi operativni rizik na dnevnom nivou oko pravilnog funkcionisanja samog softvera ili računarskih komponenti od kojih taj softver zavisi. Ovakav pristup je veoma povoljan za korisnika zato što unapred zna šta dobija, može sa sigurnošću da predvidi svoje troškove i može da se posveti svojim poslovnim ciljevima.

Kada se nad *Cloud* tehnologijama definiše *ITSM* radno okruženje koje obuhvata servisne ljude, procese i kompanijske funkcije dobija se kompanija sposobna da isporuči *Cloud* servis. U zavisnosti od tehnologija na kojima su zasnovani, *Cloud* servisi se dele na:

1) Infrastrukturu kao servis (eng. Infrastructure as a Service - IaaS)

Infrastruktura kao servis podrazumeva da je dobavljač usluga odgovoran za centar podataka, *Cloud* infrastrukturne komponente (stalnu memoriju, računarske komponente, komunikacionu opremu, virtualizaciju) i sve prateće uslove neophodne za rad infrastrukturnih tehnologija kao što su građevinski objekat, energetska napajanje, održavanje temperaturnih uslova (hlađenje), informaciona bezbednost, fizička bezbednost, dok je klijent odgovoran za operativni sistem, aplikaciju i podatke.

2) Platforma kao servis (eng. Platform as a Service - PaaS)

Cloud platforma kao servis podrazumeva da je dobavljač usluga odgovoran za centar podataka, *Cloud* infrastrukturne i platformske komponente (upravljanje podacima, operativnim sistemom, procesnom virtualnom mašinom, komunikacijama, softverski definisanim smeštanjem aplikativnih paketa, bezbednosnim mehanizmima, automatizacijom i orkestracijom, dijagnostikom, i dr.) opisanim u poglavlju (v. odeljak 4.2.1).

3) Softver kao servis (eng. Software as a Service - SaaS)

Softver kao servis je koncept u kojem se podrazumeva da je dobavljač *Cloud* usluga pored infrastrukturnih i platformskih komponenti odgovoran i za aplikaciju, dok je klijent odgovoran samo za korišćenje sistema i osnovnu administraciju koja podrazumeva dodatno administrativno *IT* osoblje (za održavanje korisničkih prava, korisničkih stanica, mobilnih uređaja, računarskih mreža itd.).

5. KOMBINATORNE METODE ZA PRIDRUŽIVANJE VIRTUALNIH I FIZIČKIH MAŠINA SISTEMIMA

Osnove kombinatorike korišćene u ovoj doktorskoj disertaciji nalaze se u [[49]-[50]]. Deo ovih kombinatornih alata je korišćen u primeru ove doktorske disertacije, a ostatak bi bio primenjiv u nekim drugim slučajevima raspoređivanja koji mogu da se pojave u praksi. U radu [[49]] objektima „Trougaoni sistemi” pridruženi su nizovi (reči) od simbola, kojima su jednoznačno određeni tj. generisani trougaoni sistemi. Da bi pridruživanje bilo obostrano jednoznačno, korišćena je teorija grupa, faktor grupe i izomorfizam odgovarajućih faktor grupa. Ispravnost pridruživanja je uzrokovana zadovoljavanjem odgovarajućih uslova, time je postignuto da se dobiju u toj interpretaciji svi Trougaoni sistemi i da su svaka dva različita. Delovi udžbenika [[50]] koji su korišćeni, pored klasičnih kombinatornih alata sadrže formulu uključenja-isključenja kao i njene posledice primenom Demorganovog zakona. Takođe je prikazana veza Stirlingovih brojeva (brojevi particija skupa na određen broj podskupova), formule uključenja-isključenja i surjektivnih funkcija.

Proces pridruživanja virtualnih i fizičkih mašina *ADMS* sistemima prikazuje se kroz raspoređivanje n objekata u k kontejnera kao što sledi.

Na koliko različitih načina se mogu rasporediti n objekata u k kontejnera tako da je svaki objekat u nekom kontejneru i nema praznih kontejnera, ako se

- 1) objekti RAZLIKUJU i kontejneri RAZLIKUJU
- 2) objekti NE RAZLIKUJU i kontejneri RAZLIKUJU
- 3) objekti RAZLIKUJU i kontejneri NE RAZLIKUJU
- 4) objekti NE RAZLIKUJU i kontejneri NE RAZLIKUJU

Problem će se rešiti na primeru $n=5$ i $k=3$, što neće uticati na opštost rešenja.

5.1. Objekti se razlikuju i kontejneri se razlikuju

Ovaj primer je rešen na dva načina kako bi se došlo do zatvorene formule za Stirlingov broj koji je značajan u raznim problemima.

Prvi način korišćenjem formule uključenja-isključenja.

Neka je $A=\{1,2,3,4,5\}$ skup objekata i $B=\{1,2,3\}$ skup kontejnera.

Pokazaće se da je broj svih mogućnosti jednak broju svih surjektivnih funkcija skupa od n elemenata u skup od k elemenata. Broj elemenata skupa A , označava se sa $|A|$.

Rešićemo pomoću formule uključenja-isključenja koja glasi:

$$|B_1 \cup B_2 \cup B_3| = |B_1| + |B_2| + |B_3| - |B_1 \cap B_2| - |B_1 \cap B_3| - |B_2 \cap B_3| + |B_1 \cap B_2 \cap B_3|$$

odnosno pomoću specijalnog slučaja prethodne formule za

$$|B_1| = |B_2| = |B_3| = a_1$$

$$|B_1 \cap B_2| = |B_1 \cap B_3| = |B_2 \cap B_3| = a_2$$

$$|B_1 \cap B_2 \cap B_3| = a_3$$

pa je

$$|B_1 \cup B_2 \cup B_3| = 3 a_1 - 3 a_2 + a_3 = \binom{3}{1} a_1 - \binom{3}{2} a_2 + \binom{3}{3} a_3$$

B_1 skup raspoređivanja u kojima je kontejner 1 prazan,

B_2 skup raspoređivanja u kojima je kontejner 2 prazan,

B_3 skup raspoređivanja u kojima je kontejner 3 prazan.

Tada je

$$B_1 \cup B_2 \cup B_3$$

skup raspoređivanja u kojima je bar jedan kontejner prazan, a komplement toga skupa

$$\overline{B_1 \cup B_2 \cup B_3}$$

je skup svih raspoređivanja u kojim nijedan kontejner nije prazan tj. skup raspoređivanja u kojima nema praznih kontejnera, a to je ono što se traži.

Kako je

$$|B_1| = |B_2| = |B_3| = a_1 = 2^5$$

$$|B_1 \cap B_2 \cap B_3| = a_3 = 0^5 = 0$$

$$|B_1 \cap B_2| = |B_1 \cap B_3| = |B_2 \cap B_3| = a_2 = 1^5$$

sledi da je

$$\overline{B_1 \cup B_2 \cup B_3} = 3^5 - |B_1 \cup B_2 \cup B_3| = 3^5 - 3 a_1 + 3 a_2$$

$$3^5 - 3 \cdot 2^5 + 3 \cdot 1^5 = 150$$

Broj raspoređivanja 5 različitih objekata u 3 različita kontejnera, tako da u svakom kontejneru je bar jedan objekat, jednak je broju **sirjektivnih** funkcija skupa objekata $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ u skup kontejnera $B = \{1, 2, 3\}$. Na primer $\binom{12345}{13212}$ je sirektivna funkcija skupa A u skup B koja određuje da su objekti 1 i 4u kontejenru **1**, objekti 3 i 5 u kontejneru **2** i objekat 2 u kontejneru **3**.

Kako je

$$\begin{aligned} 3^5 - |B_1 \cup B_2 \cup B_3| &= \binom{3}{0}3^5 - \binom{3}{1}2^5 + \binom{3}{2}1^5 - \binom{3}{3}0^5 = \\ &= \binom{3}{3}3^5 - \binom{3}{2}2^5 + \binom{3}{1}1^5 - \binom{3}{0}0^5 = \\ &= (-1)^3 \sum_{i=1}^3 (-1)^i \binom{3}{i} i^5 = 150 \end{aligned}$$

to za

$$|A| = n \quad \text{i} \quad |B| = k \leq n$$

sledi generalizacija:

$$|\{f: A \rightarrow B\}| = (-1)^k \sum_{i=1}^k (-1)^i \binom{k}{i} i^n$$

Za $k = n$ imamo da je

$$n! = (-1)^n \sum_{i=1}^n (-1)^i \binom{n}{i} i^n$$

Drugi način korišćenjem Stirlingovih brojeva

Izračunaćemo broj svih tročlanih particija skupa $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ tj. broj svih tročlanih skupova čiji elementi su neprazni podskupovi skupa od 5 elemenata koji su međusobno disjunktni i čija unija je jednaka tom skupu A (koji se zove Stirlingov broj S_3^5) tj.

$$10: \{ \{1\}, \{2\}, \{3, 4, 5\} \}, \{ \{1\}, \{3\}, \{2, 4, 5\} \}, \dots, \{ \{4\}, \{5\}, \{1, 2, 3\} \}$$

$$15: \{ \{1\}, \{2, 3\}, \{4, 5\} \}, \{ \{1\}, \{2, 4\}, \{3, 5\} \}, \dots, \{ \{5\}, \{3, 4\}, \{1, 2\} \}$$

Kako se kontejneri razlikuju to je redosled tih podskupova bitan, pa sada svaka od tih 25 mogućnosti raspoređivanja, ustvari predstavlja 6 raspoređivanja!

Prema tome traženi broj je:

$$25 \cdot 6 = S_3^5 \cdot 3! = \left(\binom{5}{3} + \binom{5}{2} \binom{3}{2} \frac{1}{2!} \right) 3! = (10 + 15) \cdot 3! = 150$$

a to je ustvari broj svih surjektivnih funkcija skupa $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ u skup $B = \{1, 2, 3\}$.

Na osnovu prvog i drugog načina rešavanja zadatka sledi

$$S_3^5 \cdot 3! = (-1)^3 \sum_{i=1}^3 (-1)^i \binom{3}{i} i^5$$

odnosno

$$S_3^5 = \frac{(-1)^3}{3!} \sum_{i=1}^3 (-1)^i \binom{3}{i} i^5$$

Generalizacija:

$$S_k^n = \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{i=1}^k (-1)^i \binom{k}{i} i^n$$

Prema tome sledi tvrđenje:

Broj svih surjektivnih funkcija n - točlanog skupa u k - točlani skup podeljen sa $k!$ jednak je broju S_k^n svih particija skupa od n elemenata na k nepraznih disjunktih podskupova.

5.2. Objekti se ne razlikuju i kontejneri se razlikuju

Prvi način: Poređa se 5 objekata koji se ne razlikuju, jedan pored drugog u vrstu, a zatim na četiri mesta između tih 5 objekata stavljaju se ukupno dve pregrade, jer je time 5 objekata jednoznačno podeljeno u 3 kontejnera. Levo od prve pregrade su objekti u kontejneru **1**, objekti između dve pregrade su u kontejneru **2** i objekti desno od druge pregrade su u kontejneru **3**.

o|o|ooo, o|oo|oo, o|ooo|o, oo|o|oo, oo|oo|o, ooo|o|o

$$C_2^4 = \binom{4}{2} = 6.$$

To su kombinacije bez ponavljanja od 4 elementa druge klase.

Drugi način: U prvoj vrsti je 5 objekata koji se ne razlikuju, a u drugoj vrsti ispod svakog objekta napisan je kontejner u koji je on smešten odnosno:

$$\begin{pmatrix} 12345 \\ 12333 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 12345 \\ 12233 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 12345 \\ 12223 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 12345 \\ 11233 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 12345 \\ 11223 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 12345 \\ 11123 \end{pmatrix}$$

(1) To su kombinacije sa ponavljanjem od tri elementa pete klase u kojima se svaki element pojavljuje bar jednom ili

(2) To su petocifreni brojevi formirani samo od cifara skupa $A = \{1, 2, 3\}$, takvih da u svakom petocifrenom broju svaka sledeća cifra nije manja od prethodne i svaka od cifara iz skupa A se pojavljuje bar jednom ili

(3) Surjektivne neopadajuće funkcije skupa $\{1,2,3,4,5\}$ u skup $\{1,2,3\}$

$$\binom{3}{3} \bar{C}_5^3 - \binom{3}{2} \bar{C}_5^2 + \binom{3}{1} \bar{C}_5^1 = \binom{3+5-1}{5} - 3 \cdot \binom{2+5-1}{5} + 3 \cdot \binom{1+5-1}{5} = 6$$

(4) Broj rešenja jednačine $x + y + z = 5$ u skupu prirodnih brojeva N .

5.3. Objekti se razlikuju i kontejneri se ne razlikuju

Sve particije skupa $\{1,2,3,4,5\}$ na tri neprazna podskupa.

Postoje samo dva tipa ovih particija prema broju elemenata u podskupovima i to su 113 i 122. Oznaka 113 znači da su dva podskupa jednočlana i jedan podskup

tročlani, dok oznaka 122 označava da je jedan podskup jednočlan, a dva podskupa dvočlana. Prvih ima 10 a drugih 15.

$$S_3^5 = \binom{5}{3} + \binom{5}{2} \binom{3}{2} \frac{1}{2!} = 10 + 15 = 25$$

$$\begin{aligned} & \{ \{1\}, \{2\}, \{3,4,5\} \}, \{ \{1\}, \{3\}, \{2,4,5\} \}, \{ \{1\}, \{4\}, \{2,3,5\} \}, \{ \{1\}, \{5\}, \{2,3,4\} \} \\ & \{ \{2\}, \{3\}, \{1,4,5\} \}, \{ \{2\}, \{4\}, \{1,3,5\} \}, \{ \{2\}, \{5\}, \{1,3,4\} \}, \{ \{3\}, \{4\}, \{1,2,5\} \} \\ & \{ \{3\}, \{5\}, \{1,2,4\} \}, \{ \{4\}, \{5\}, \{1,2,3\} \} \\ & \{ \{1\}, \{2,3\}, \{4,5\} \}, \{ \{1\}, \{2,4\}, \{3,5\} \}, \{ \{1\}, \{2,5\}, \{3,4\} \}, \{ \{2\}, \{1,3\}, \{4,5\} \}, \\ & \{ \{2\}, \{1,4\}, \{3,5\} \}, \{ \{2\}, \{1,5\}, \{3,4\} \}, \{ \{3\}, \{1,2\}, \{4,5\} \}, \{ \{3\}, \{1,4\}, \{2,5\} \}, \\ & \{ \{3\}, \{1,5\}, \{2,4\} \}, \{ \{4\}, \{1,2\}, \{3,5\} \}, \{ \{4\}, \{1,3\}, \{2,5\} \}, \{ \{4\}, \{1,5\}, \{2,3\} \}, \\ & \{ \{5\}, \{1,2\}, \{3,4\} \}, \{ \{5\}, \{1,3\}, \{2,4\} \}, \{ \{5\}, \{1,4\}, \{2,3\} \} \end{aligned}$$

5.4. Objekti se ne razlikuju i kontejneri se ne razlikuju

Sve mogućnosti (ima ih samo dve) raspoređivanja 5 objekata koji se ne razlikuju u 3 kontejnera koji se ne razlikuju (pri čemu nema praznih kontejnera) predstavljeno je sledećim zapisom:

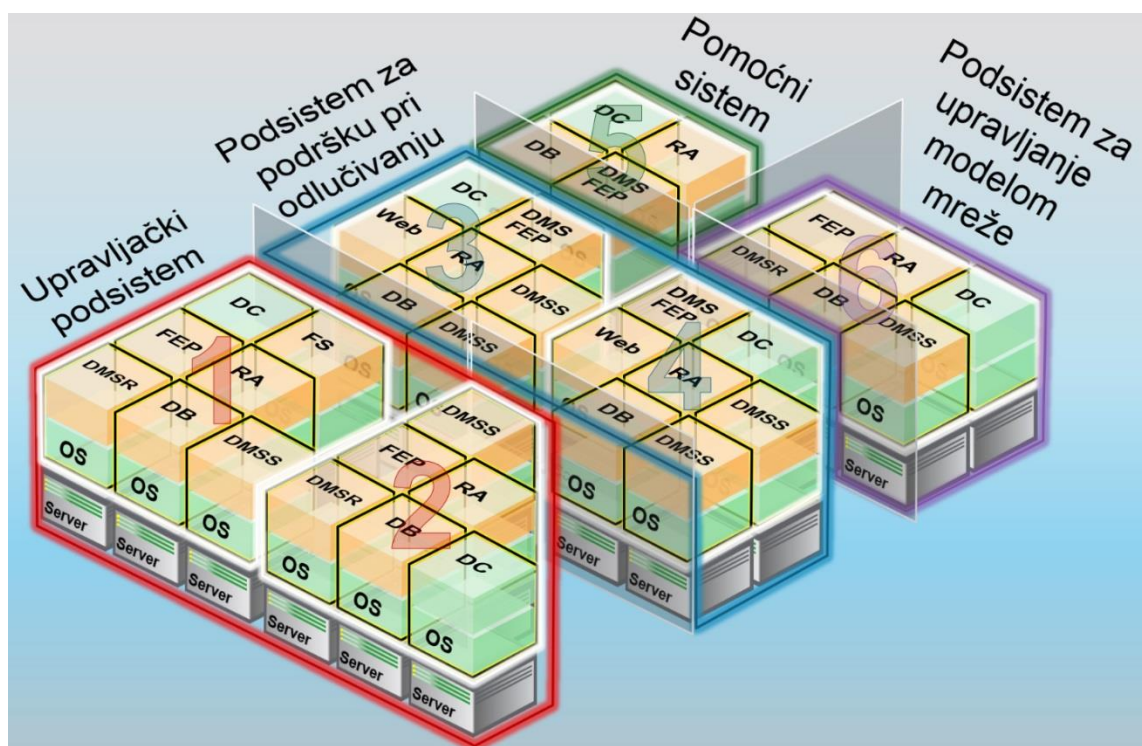
$$\underline{|0| |0| |000|} \quad \underline{|0| |00| |00|}$$

ili zapisima 113 i 122.

U ovom slučaju ne postoji zatvorena formula, ali postoji jednostavan algoritam za generisanje svih mogućnosti. Prikažimo ga na primeru $n = 10$ objekata i $k = 3$ kontejnera. Mogućnosti su 118, 127, 136, 145, 226, 235, 244 i 334. Odavde je algoritam očevidan.

6. TRADICIONALNO ADMS REŠENJE

Tradicionalno ADMS rešenje, u ovoj doktorskoj disertaciji podrazumeva arhitekturu rešenja zasnovanu na fizičkoj (računarskoj) arhitekturi bez korišćenja virtualizacionih platformi. Tipično tradicionalno rešenje koje je uzeto kao polazna osnova u ovom istraživanju prikazano je na slici 2 i opisano je u sledeća tri odeljka 6.1-6.3. Osnovne funkcionalne blokove iz kojih se tradicionalno ADMS rešenje sastoji predstavljeno je u 6.1. U 6.2 opisana je organizacija funkcionalnih blokova u sisteme i podsisteme. Ključni tokovi podataka prikazani su u 6.3.



Slika 2: Tradicionalno ADMS rešenje

6.1. Funkcionalni blokovi

Tradicionalno ADMS rešenje prikazano na slici 2, sastoji se od sledećih funkcionalnih blokova koji odgovaraju osnovnim komponentama opisanim u poglavlju 3:

Web (eng. Web Server) - predstavlja funkcionalni blok sa unapred postavljenim web serverom i klijentskim ADMS web aplikacijama. Ovo skalabilno rešenje, lako za održavanje, sastoji se iz tri korisničke aplikacije:

- 1) Osnovna klijentska aplikacija omogućuje korporativnim korisnicima pristup stanju mreže (statičkim i dinamičkim podacima) isključivo sa pravima čitanja, građenje svesti o situaciji (eng. *Situational Awareness*) raznim aplikativnim

paketima i automatizovanim mehanizmima za pravljenje izveštaja, rukovanje zahtevima za radovima održavanja mreže i omogućuje geografski distribuiranim rukovodiocima regionalnih kancelarija vođenje posada u polju.

- 2) Podrška pozivnom centru omogućuje operaterima u pozivnom centru da obave prijem i obradu incidenata prijavljenih od strane korisnika kao što su na primer nestanak struje ili pad kvaliteta isporuke električne energije.
- 3) Treća web aplikacija namenjena je rukovanju inženjerskim posadama na terenu i ima tri osnovne namene:
 - a) zamena papirnih mapa i građenje svesti o situaciji
 - b) učestvuje u procesu upravljanja planiranim i neplaniranim ispadima, obezbeđuje efikasnu koordinaciju između operatera u kontrolnom centru i inženjerskih posada na terenu (koji rade na incidentima);
 - c) Efikasno i bezbedno izvršenje planiranih prekidačkih promena (omogućuje kontrolnom centru da izda ručnu komandu a posadi da ažurira stanje sistema nakon izvršene operacije);

DMSR (eng. DMS Real Time) – predstavlja server distributivnog menadžment sistema za rad u realnom vremenu. Uobičajeno se može nalaziti u podsistemu za:

- 1) Upravljanje koji koriste isključivo ovlašćeni operateri u kontrolnim centrima za vođenje sistema, nadzor rada mreže, prijavu i rukovanje alarmima, izdavanje komandi ka polju, optimizaciju rada sistema (upravljanje u zatvorenoj petlji prema unapred definisanim ciljevima). Ovom funkcionalnom bloku se pristupa isključivo preko tradicionalne klijentske aplikacije.
- 2) Podršku pri odlučivanju omogućuje pristup sistemu raznim službama u elektrodistributivnom preduzeću za analizu indeksa performansi sistema (npr. gubitaka u mreži), pravljenje raznih vrsta automatizovanih izveštaja, podršku rada za web aplikacije itd. Omogućuje pristup sistemu raznih sektora u elektrodistributivnom preduzeću.
- 3) Upravljanje modelom mreže gde obezbeđuje pravilno rukovanje životnim ciklusom modela elektrodistributivne mreže uključujući i neophodne provere.

DMSS (eng. DMS Simulation) - po softverskoj strukturi je veoma sličan DMSR ali obuhvata skup aplikativnih paketa za rad u autonomnom režimu sa povremenim poravnanjem i može se nalaziti u podsistemu za:

- 1) Upravljanje gde je namenjen operaterima za uzročno-posledične analize u slučaju ispada pri radu na planiranim prekidačkim promenama.
- 2) Podršku pri odlučivanju koja obuhvata: pripremu lista prekidačkih akcija (operativno planiranje), podešavanje relejne zaštite, analiza kratkih spojeva, određivanje optimalne konfiguracije (npr. minimizacije gubitaka energije),

dugoročno planiranje izgradnje mreže (određivanje optimalne lokacije ugradnje kondenzatora, naponskih regulatora; određivanje broja tipa i lokacije uređaja za automatizaciju, priključivanje novih potrošača; besprekidno prebacivanje opterećenja, analize naponskih prilika, određivanje pouzdanosti, proračun gubitaka itd).

FEP (eng. Front End Processor) sadrži protokole za komunikaciju sa poljem, odgovoran je za prikupljanje podataka u realnom vremenu od RTU i IED-a, neposredno izdavanje upravljačkih komandi uređajima, konverziju analognog/digitalnih veličina u inženjerske merne jedinice, osnovne provere i prosleđivanje obrađenih veličina DMS funkcionalnom bloku. Postoje razni protokoli i konfiguracije komunikacije između FEP-a i uređaja, od kojih se izdvajaju dva koncepta komunikacije: 1) Periodično prikupljanje podataka prema unapred definisanom vremenskom intervalu; 2) Samoinicijativno prosleđivanje značajnih promena od strane uređaja. Pored osnovnih analognih i digitalnih vrednosti, mogu se prikupljati i prateći podaci (npr. mere kvaliteta, vreme).

DC funkcionalni blok sadrži domenski kontroler (v. odeljak 3.2).

FS (eng. Field Simulator) je odgovoran za simulaciju uređaja u polju i njihove pobude koje se koriste kao ulazi za DMS i SCADA funkcionalne blokove za svrhu testiranja (u inicijalnim fazama implementacije), treninga, obuke operatera, itd.

RA (eng. Remote Access) - predstavlja servis za stvaranje komunikacionog tunela između DMS aplikativnog servera i spoljašnjih korisnika koji se nalaze van lokalne mreže (ne pripadaju istom domenu). Njegova posebna prednost je što izlaže samo jedan komunikacioni port što smanjuje površinu potencijalnog napada i olakšava kontrolu bezbednosti sistema.

DB (eng. Database Module) - sastoji se od servera relacionih baza podataka odgovornih za čuvanje dinamičkih podataka sa polja, istorijskih promena mreže i arhiviranje podataka različitih funkcionalnih blokova.

Pored rukovanja elektrodistributivnom mrežom, funkcionalni blokovi mogu imati više različitih instanci koje odgovaraju različitim poslovnim kontekstima kao što su upravljanje u realnom vremenu, nadzor sa isključivim pravom čitanja (tj. bez prava upravljanja), analize u autonomnom režimu sa povremenim poravnanjem, simulacije, treninga dispečera, obezbeđivanje i kontrolu kvaliteta, održavanje modela itd. Dodatno u odnosu na poslovne kontekste postoje i klusterski konteksti koji obezbeđuju dodatne instance u vidu aktivnih i pasivnih partnera, koji obezbeđuju rad u režimu visoke dostupnosti (otporni su na otkaz računarskih komponenti) ili poslovni kontinuitet u slučaju katastrofalnog događaja koji onemogućuje rad celog sistema. Aktivni partneri su vlasnici podataka i odgovorni su za obradu i upravljanje, dok pasivni partneri prihvataju

i obrađuju podatke bez povratne reakcije. Promena stanja između aktivnih i pasivnih partnera u klasteru unutar jednog ADMS sistema se izvršava automatski nakon ispada aktivnog partnera usled otkaza računarske komponente. Promena uloga partnera između pomoćnog i glavnog sistema se pokreće ručno nakon što se utvrdi da je ceo sistem nepovratno ispao iz produkcije. U zavisnosti od plana poslovnog kontinuiteta elektrodistributivna preduzeća mogu imati jedan kontrolni centar koji ima pristup svim centrima podataka ili može imati i pomoćni kontrolni centar.

Uobičajeno, ADMS se smešta na farmu fizičkih servera, gde se instance svakog od gore pomenutih funkcionalnih blokova smeštaju na individualni fizički server izuzev nekritičnih DMS i FEP funkcionalnih blokova koji se u nekim slučajevima mogu smestiti zajedno da bi se postigla određena ekonomska efikasnost.

6.2. Organizacija sistema i podsistema

Tradicionalna ADMS rešenja se uobičajno sastoje iz dva sistema:

- 1) Glavni sistem (eng. Main System) predstavlja aktivni sistem projektovan da podrži dnevno poslovanje elektrodistributivnog preduzeća (uključujući i vođenje elektrodistributivne mreže) u punom kapacitetu i sastoji se od sledećih podsistema:
 - a) Upravljački (eng. Control) podsistem predstavlja najkritičniji sistem koji se koristi za upravljanje elektrodistributivnom mrežom od strane operatera u kontrolnom centru.
 - b) Podsistem za podršku pri odlučivanju (eng. Decision Support) pruža aplikativnu podršku inženjerima koji se bave zaštitom mreže, planiranjem, analizama i izveštavanjima, posadama na terenu i drugim korporativnim korisnicima.
 - c) Podsistem za održavanje modela elektrodistributivne mreže (eng. Network Model), obezbeđuje inženjerima odgovornim za održavanje modela kontrolisan način rukovanja promenama modela elektrodistributivne mreže. Njegove funkcionalnosti obuhvataju: rukovanje životnim ciklusom promena, pripremu promene modela (iz geografsko informacionog sistema i drugih izvora podataka) i konfiguracije, testiranje komunikacije sa SCADA tačkama, ažuriranje operativnih prikaza (crtanje transformatorskih stanica, šematskih prikaza) i razne vrste provera izmena modela i konfiguracije mreže pre njihove primene u produkcioni mrežu.

- 2) Pomoćni sistem (eng. Backup system) koristi se u slučaju neplaniranog ispada glavnog sistema ili u slučaju planiranog održavanja glavnog sistema. Uobičajeno se smešta na odvojenu geografsku lokaciju kako bi se obezbedio poslovni kontinuitet u slučaju ispada glavnog sistema u slučaju katastrofalnog događaja na lokaciji glavnog centra podataka. U zavisnosti od poslovnih zahteva pomoćni sistem može biti projektovan da obezbedi minimalni kapacitet sa kritičnim funkcionalnostima (tj. da sadrži jedan pomoćni podsistem) ili da bude potpuna replika glavnog sistema.

6.3. Tokovi podataka

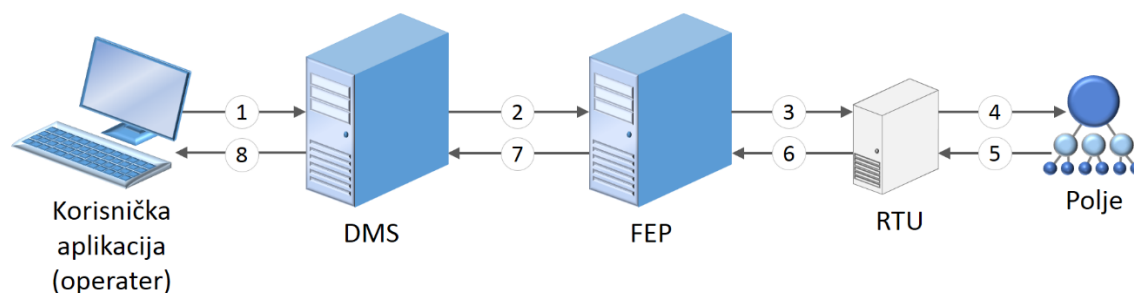
U tradicionalnim ADMS rešenjima postoji više tokova podataka koji su uslovljeni poslovnim procesima kao i nefunkcionalnim zahtevima koji se postavljaju pred sistem kao što su obezbeđivanje: visoke dostupnosti, poslovnog kontinuiteta, odziva u realnom vremenu itd.

Tokovi podataka se dele u tri kategorije:

- 1) Komunikacija sa uređajima u polju – koja se odlikuje potrebom za prenos velike količine podataka ali su podaci relativno niske kompleksnosti.
- 2) Komunikacija u klasteru – gde parovi računara imaju iste podatke i gde je brzina prenosa podataka od najveće važnost.
- 3) Promena modela podataka-koje se javljaju relativno retko ali je njihov uticaj na rad sistema velik pa su potrebne provere na više nivoa.

6.3.1. Komunikacija sa uređajima u polju

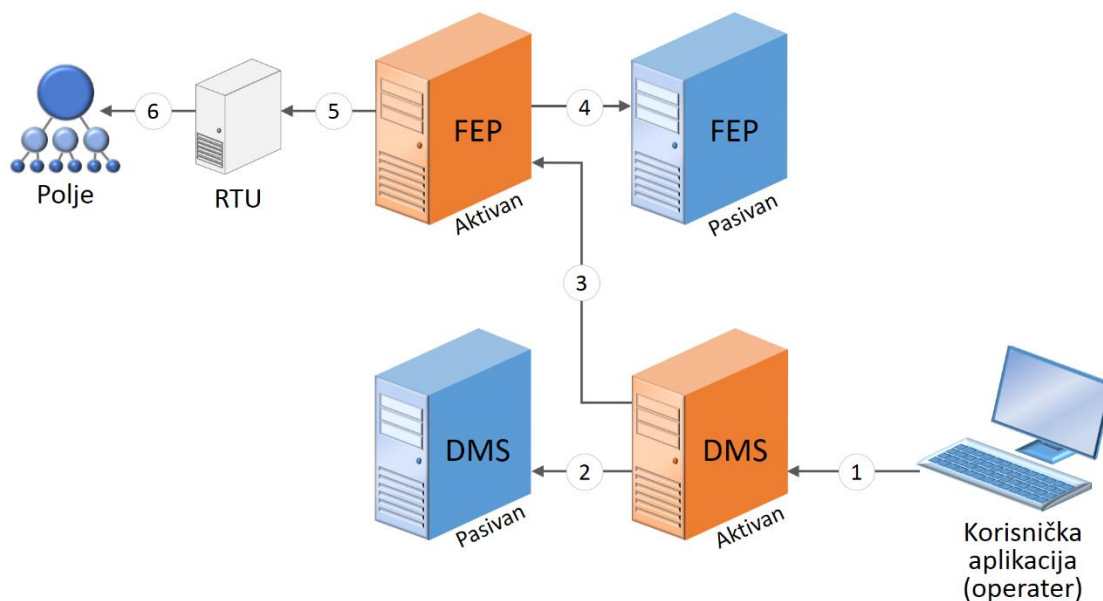
Na slici 3 prikazan je DMS funkcionalni blok koji prihvata i obrađuje komandu uz odgovarajuće provere (1) i prosleđuje je FEP funkcionalnom bloku (2). FEP dalje proverava komandu, obrađuje je i šalje ka uređaju u polju (3). Komanda se izvršava u polju (4) i nakon toga se prouzrokuje odgovarajuća promena u očitavanju koja se prihvata u RTU (5). Promena se nazad šalje FEP-u (6), FEP radi osnovnu proveru, konverziju analogno/digitalnih vrednosti i prosleđuje vrednost DMS funkcionalnom bloku (7), koji radi dalju obradu i proveru i prosleđuje promenu korisničkoj aplikaciji (8), nakon čega promene počinju da budu vidljive krajnjem korisniku (operateru).



Slika 3: Tok podataka između korisničke aplikacije i uređaja u polju

6.3.2. Komunikacija u klasteru

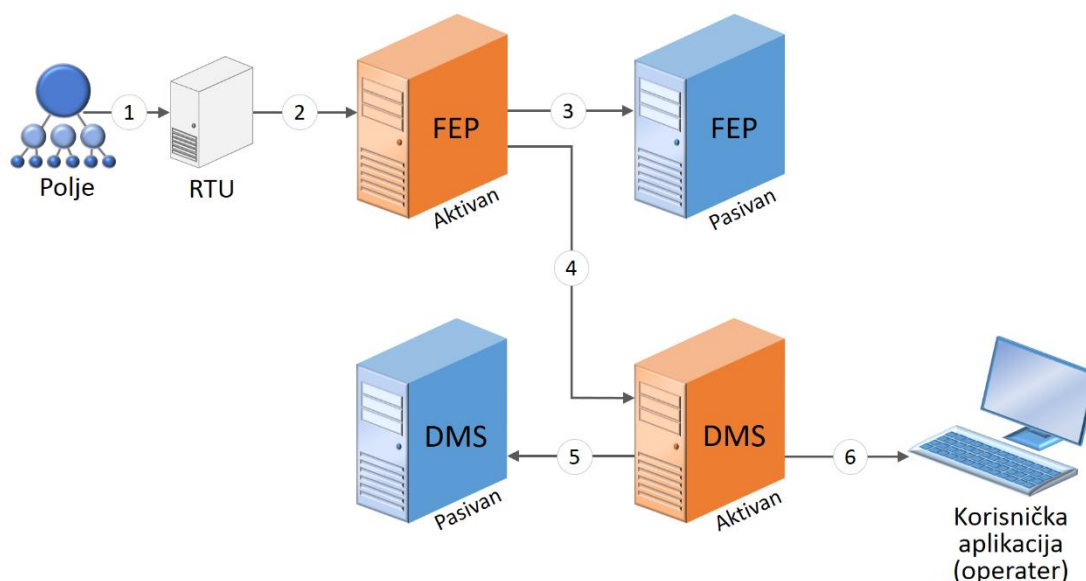
Slika 4 predstavlja tok podataka između operatera i polja u arhitekturi koja podržava rad u režimu visoke dostupnosti. U ovom primeru postoje dva para *DMS* i *FEP* funkcionalnih blokova (aktivnih i pasivnih) koji rade u režimu visoke dostupnosti. U prvom koraku (1) operater izdaje komandu na korisničkoj aplikaciji. Ta komanda se prihvata u aktivnom *DMS* funkcionalnom bloku i asinhrono (neblokirajuće) prosleđuje (2) pasivnom *DMS* funkcionalnom bloku (koji postoji za slučaj da aktivni prestane sa radom usled otkaza računarskih komponenti) i aktivnom *FEP*-u (3) koji je prosleđuje pasivnom *FEP*-u (4) i izvršava preko (5) *RTU* uređaja na polju (6).



Slika 4: Tok podataka između operatera i polja (režim visoke dostupnosti)

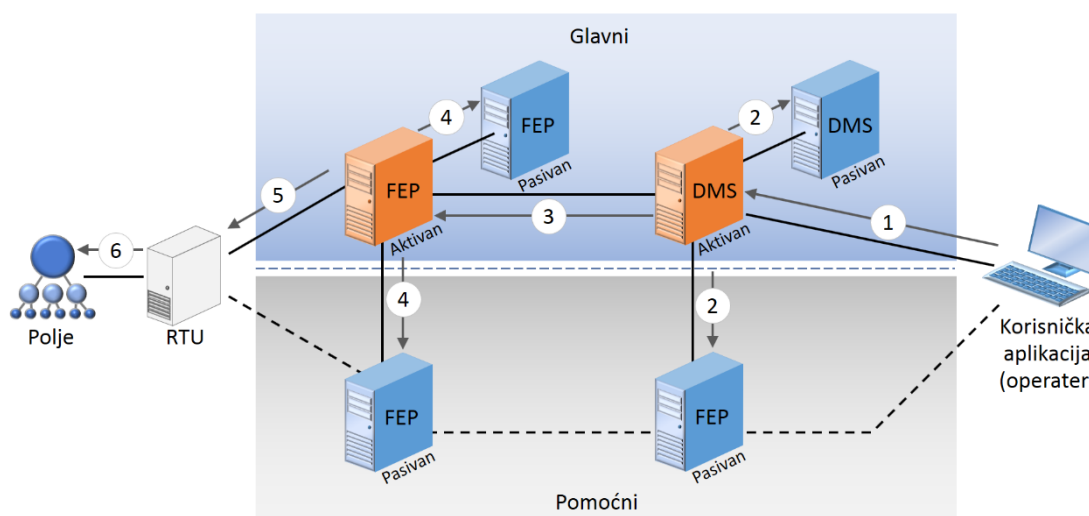
Slika 5 prikazuje tok podataka nakon što se desila promena u polju. Uređaj u polju prvo očitava novonastalu promenu (1), nakon čega je prosleđuje aktivnoj instanci *FEP* funkcionalnog bloka (2). Ta promena se asinhrono (neblokirajuće) prosleđuje (3) pasivnoj instanci *FEP* funkcionalnog bloka (koji je prihvata i biva spreman da preuzme dalje obrađivanje u slučaju otkaza aktivne instance). Zatim se promena dalje prosleđuje

aktivnom DMS funkcionalnom bloku (4) koji je asinhrono (neblokirajuće) prosleđuje svojoj pasivnoj instanci (5) i obrađuje nakon čega postaje vidljiva operateru na korisničkoj aplikaciji (6).

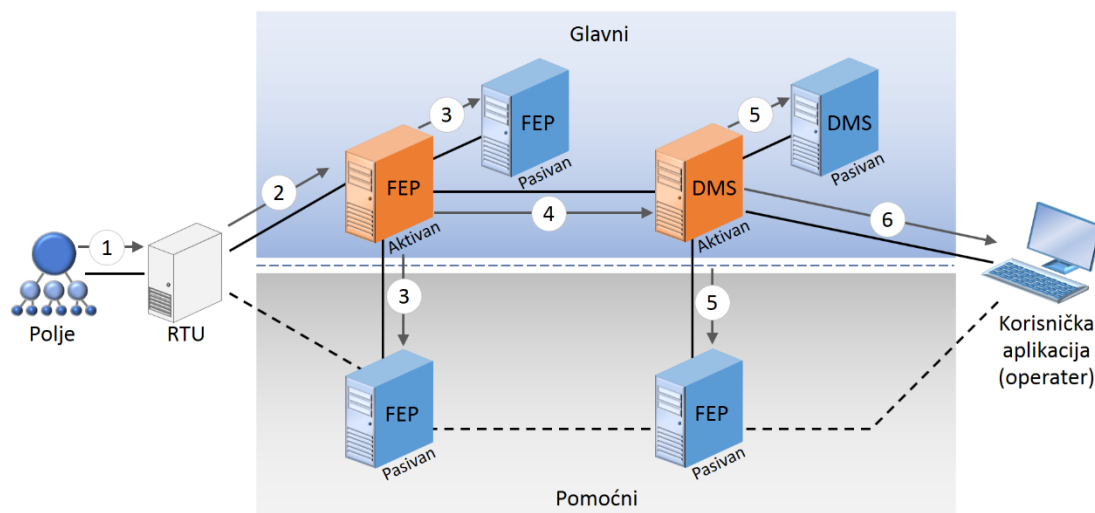


Slika 5: Tok podataka između polja i operatera (režim visoke dostupnosti)

Slika 6 prikazuje tokove podataka između aktivnih i pasivnih instanci funkcionalnih blokova raspoređenih u dva centra podataka. U prvom koraku (1) operater izdaje komandu na korisničkoj aplikaciji. Ta komanda se prihvata u aktivnom DMS funkcionalnom bloku i asinhrono (neblokirajuće) prosleđuje, prvom pasivnom DMS funkcionalnom bloku (koji postoji zbog visoke dostupnosti), zatim se asinhrono prosleđuje drugom pasivnom partneru koji pripada pomoćnom sistemu (2). Nakon toga se prosleđuje aktivnom FEP-u (3) koji je prosleđuje pasivnim FEP-ovima u glavnom i pomoćnom sistemu (4). Na kraju se prosleđuje RTU uređaja (5) i izvršava u polju (6).



Slika 6: Tok podataka između operatera i polja (sa pomoćnim sistemom)



Slika 7: Tok podataka između polja i operatera (sa pomoćnim sistemom)

Slika 7 prikazuje tok podataka od polja prema korisničkoj aplikaciji (operateru) kada postoje dva centra podataka. Promena se očitava preko RTU uređaja (1), stiže do aktivne FEP instance (2). Odatle se prosleđuje na pasivne instance (3) i aktivni DMS funkcionalni blok (4). Iz DMS funkcionalnog bloka se dalje prosleđuje ka pasivnim DMS instancama (5). Nakon obrade promene u aktivnom DMS funkcionalnom bloku, podaci se šalju korisničkoj aplikaciji (6).

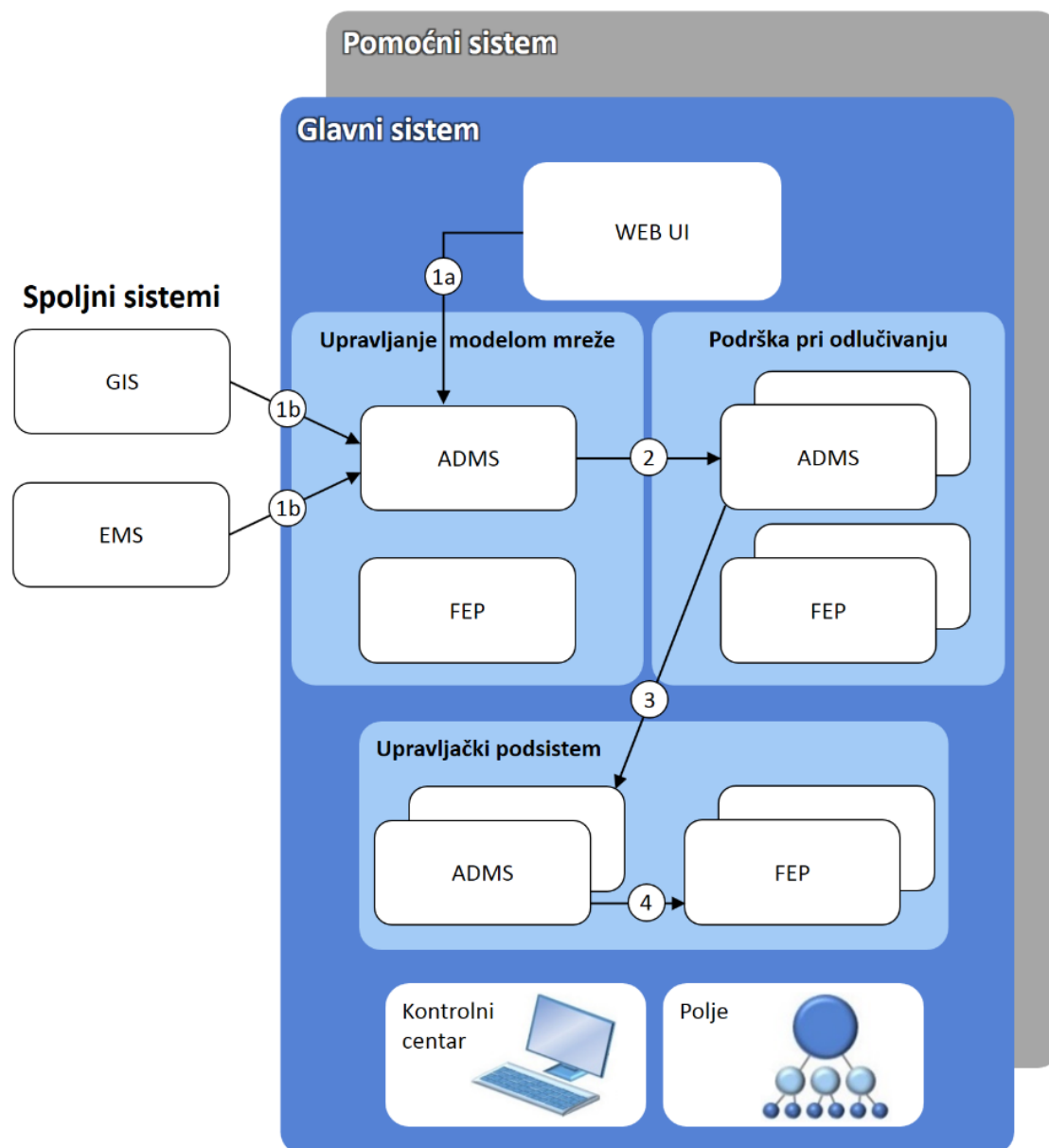
6.3.3. Promene u modelu podataka

ADMS model podataka sadrži informacije o izgrađenosti i povezanosti elektrodistributivne mreže, kao i o karakteristikama uređaja i veza između njih. Pošto se elektrodistributivna mreža kontinualno menja i potrebno je poravnavati model podataka sa stanjem na terenu. Ove promene nisu česte kao SCADA promene (koje se menjaju na nivou sekunde) ali se i one mogu menjati i više desetina puta dnevno. Promene u modelu mogu značajno da utiču na observabilnost i kontrolabilnost elektroenergetske mreže tako je tačnost podataka i poravnatost sa stvarnim stanjem izuzetno važna. Zbog toga se pri unosu promena u modelu i njihovoj propagaciji kroz sistem vodi računa o konzistentnosti podataka i postoji više nivoa kontrole pri prenosu podataka.

Postoje dva osnovna izvora promena u modelu ali u oba slučaja prolaze se isti nivo provere ispravnosti promena:

- 1) Promene uvezene iz nekih drugih sistema preko integracionih adaptera. Najčešće se uvoze podaci iz GIS i EMS sistema.
- 2) Promene unesene od strane inženjera koji planiraju razvoj mreže, ili izmene unete u kontrolnom centru izazvane hitnim havarijskim problemima.

Na slici 8 prikazana je sistemska arhitektura ADMS sistema koji se koristi pri unosu, proveru ispravnosti i puštanju u rad promena modela elektrodistributivne mreže.



Slika 8: Tok podataka pri promeni modela

U prvom koraku događa se promena u modelu sistema, npr. dodaje se nova transformatorska stanica ili se menja normalno uklopno stanje prekidača. Ovakva promena može da se unese ručno uz pomoć korisničke aplikacije zasnovane na Web tehnologiji(1a), ali se mnogo češće veći broj promena istovremeno preuzimaju (importuju) iz spoljnih sistema kao sto su *GIS* ili *EMS* preko odgovarajuće prilagodne softverske komponente – adaptera (1b).

Zatim se u koraku (2) proverava ispravnost unetih izmena u model u sistemu za verifikaciju modela. Tu korisnici proveravaju rad sistema, ali se koriste simulirani podaci ili podaci iz istorije kako bi se obavila verifikacija. Ova verifikacija se može

izvršiti čim promene stignu ali se promene ne moraju preneti dalje dok se ne sakupi dovoljno promena što može trajati i više dana.

U trećem koraku podaci se prenose u sistem za podršku pri odlučivanju u kome se vrši verifikacija sa podacima iz polja. U ovom koraku glavni je zadatak izvršiti kontrolu kvaliteta sa podacima koji u tom trenutku dolaze iz SCADA sistema. Ako sve provere budu uspešno izvršene izmena modela ide u Upravljački sistem, a ako se uoči problem promena se vraća u korak 2.

U poslednjem koraku (4) promene modela stižu u Upravljački sistem gde stupaju na snagu i počinju direktno da utiču na produkcionu deo sistema. Neka elektrodistributivna preduzeća i u ovom koraku rade provere ispravnosti pre samog puštanja u rad, naročito ako se radi o delovima sistema čija izmena može da utiče na velike delove mreže.

7. METODOLOGIJA ZA VIRTUALIZACIJU ADMS REŠENJA

Migracija ADMS sistema u virtualno *Cloud* okruženje zahteva adekvatno rukovanje resursnim zahtevima sistema i dodatnim troškovima resursa koji su posledica korišćenja virtualizacione platforme [[51]], [[52]]. Pored toga, migracija ovakvog sistema sa kritičnom misijom, treba da uvaži i dodatne zahteve za otpornošću na otkaze kao i potencijalne regulatorne zahteve. Zbog toga, rezultujući proces migracije ima sledeća četiri glavna cilja:

- 1) Minimizacija broja fizičkih računara,
- 2) Obezbeđivanje otpornosti u slučaju otkaza pojedine računarske komponente,
- 3) Minimizacija kapaciteta rezervisane fizičke memorije i broja procesorskih jezgara,
- 4) Uvažavanje zahteva za fizičkom segregacijom sistema, smanjenje površine napada i omogućenje uvažavanje standarda iz oblasti bezbednosti i pouzdanosti (npr. eng. *North American Electric Reliability Corporation Critical Infrastructure Protection - NERC CIP* [[53]]).

Da bi se ispunili dati ciljevi, za virtualizaciju ADMS rešenja, korišćena je metodologija koja se sastoji iz sledećih šest koraka:

- 1) Identifikacija,
- 2) Profiliranje performansi,
- 3) Pravljenje kataloga virtualnih mašina,
- 4) Rezervacija servera,
- 5) Pridruživanje virtualnih mašina,
- 6) Verifikacija i analiza prednosti rešenja.

7.1. Identifikacija

Prvi korak migracije ADMS rešenja jeste da se odabere posmatrano ADMS rešenje i pravilno identifikuju svi njegovi sistemi, podsistemi, funkcionalni blokovi, različite instance funkcionalnih blokova i klasteri za rad u režimu visoke dostupnosti. Da bi se omogućio bezbedan rad sistema potrebno je prikupiti zahteve za izolacijom funkcionalnih blokova. Ova metodologija se ne bavi bezbednosnim aspektima ADMS rešenja, ali uvažava broj izolovanih sistema (koji se ne mogu nalaziti na istim fizičkim mašinama) kao ulazni parametar prilikom optimizacije broja fizičkih servera.

7.2. Profiliranje performansi

Da bi se prikupili zahtevi za performansama, svaki identifikovani funkcionalni blok postavlja se na jednu virtualnu mašinu, smeštenu na posebnoj fizičkoj mašini i testira se na različitim testnim scenarijima. Zahtevi za performansama funkcionalnih blokova se mere sa 5 različitih metrika:

#	Naziv Metrike	Merna jedinica
1.	Iskorišćenje procesora	[%] (Procenat)
2.	Potrošnja operativne memorije (<i>eng. RAM</i>)	GB (<i>eng. Gigabyte</i>)
3.	Protok računarske mreže (<i>eng. Networking Bandwidth</i>)	Mbit/s (<i>eng. Megabit per second</i>)
4.	Protok stalne memorije (<i>eng. Storage Throughput</i>)	MB/s (<i>eng. Megabyte per second</i>)
5.	Broj ulazno/izlaznih operacija stalne memorije (<i>eng. Storage Input/Output operations</i>)	IOPS (<i>eng. Input/Output operations per second</i>)

Tabela 1: Metrike performansi

Za svaku od ovih metrika, prikuplja se srednja vrednost na svakih 15 sekundi i izračunavaju se: minimalne, srednje i maksimalne vrednosti. Pored toga izračunavaju se i varijanse između srednjih i maksimalnih vrednosti kojima se pridaje posebna pažnja prilikom podešavanja kapaciteta virtualnih resursa.

7.3. Pravljenje kataloga virtualnih mašina

Za svaki identifikovani i analizirani funkcionalni blok, definiše se odgovarajući tip virtualne mašine koristeći sledeće principe:

- 1) Dodatna rezerva (*eng. Overprovisioning*): za najkritičnije funkcionalne blokove, virtualne mašine obezbeđuju dodatnu resursnu rezervu tako da iskorišćenje procesora bude u proseku 30% (i nikad ne dostigne maksimum), dok konzumiranje memorije treba da bude do 40%. Nepoštovanje ovog principa može dovesti do preopterećenja računarskih resursa koji su dodeljeni kritičnom funkcionalnom bloku što bi uzrokovalo pad performansi sistema i nemogućnost pravovremenog odziva.

- 2) Statička konfiguracija: resursi čije iskorišćenje lako dolazi u zasićenje (procesor i operativna memorija) konfiguriraju se statički da se osigura nesmetani rad više virtualnih mašina na jednoj fizičkoj. Neprimenjivanje ovog principa može proizvesti da se preopterećenje resursnog kapaciteta jednog funkcionalnog bloka prenese i na resursni kapacitet drugog funkcionalnog bloka.
- 3) Dinamička konfiguracija: resursi mreže i stalne memorije se ne ograničavaju jer je njihovo iskorišćenje značajno ispod njihovog kapaciteta.
- 4) Mreže visokih performansi: za virtualne mašine koristi se sintetički mrežni adapter jer obezbeđuje najbolje performanse u odnosu na emulirane adaptere; broj spoljnih virtualnih adaptera odgovara broju fizičkih mrežnih adaptera.

7.4. Rezervacija servera

Da bi se omogućio nesmetan rad virtualnog ADMS rešenja i ispunili metodološki ciljevi, broj fizičkih mašina se određuje prema sledećim principima:

- 1) Posvećeni server (eng. Dedicated Server): Svaka fizička mašina može biti ekskluzivno dodeljena samo jednom ADMS sistemu. Broj različitih ADMS sistema koji moraju biti fizički izolovani predstavlja ulazni parametar ove metodologije koji definišu arhitekture za bezbednost.
- 2) Režim rada visoke dostupnosti: Svaki ADMS sistem koji sadrži instance funkcionalnih blokova koje rade u režimu visoke dostupnosti zahteva minimum dve fizičke mašine kako bi se omogućila pravilna distribucija aktivnih i pasivnih partnera (tj. da se aktivni i pasivni partneri ne nalaze na istom serveru) i obezbedila otpornost u slučaju otkaza jedne od mašina.
- 3) Broj fizičkih mašina: Rezerviše se minimalan broj fizičkih mašina koji obezbeđuju zahtevani kapacitet, rad u režimu visoke dostupnosti (u sistemima gde je potreban) i ispunjenje zahteva za fizičkom segregacijom sistema.

7.5. Pridruživanje virtualnih mašina

Da bi se sprečilo međusobno ometanje virtualnih mašina, obezbedila otpornost na otkaze i fizička segregacija sistema, virtualne mašine se pridružuju uvažavajući sledeće principe:

- 1) Pravilno rukovanje kapacitetom (eng. Overcommitment Avoidance): Zbir virtualnih procesorskih jezgara svih virtualnih mašina na jednoj fizičkoj mašini, ne sme biti veći od broja procesorskih jezgara na toj istoj fizičkoj mašini. Zbir kapaciteta operativne memorije svih virtualnih mašina na jednoj fizičkoj mašini,

ne može biti veći od ukupnog kapaciteta operativne memorije na toj istoj fizičkoj mašini.

- 2) Segregacija sistema (eng. System Segregation): kritični servisi se fizički izoluju i dodeljuju posebnim serverima i stalnoj memoriji (svi servisi koji se odnose na izvršavanje operacija nad distributivnom mrežom u realnom vremenu se smatraju kritičnim). Nekritični servisi koriste izolovane serverske instance i zajedničku stalnu memoriju.
- 3) Distribucija Partnera: Aktivne i pasivne instance funkcionalnih blokova koje rade u režimu visoke dostupnosti se distribuiraju na različite fizičke mašine kako bi se obezbedila otpornost u slučaju otkaza jedne od mašina.
- 4) Poravnanje procesora: Kada je moguće, svaki virtualni čvor sa neuniformnim memorijskim pristupom (eng. Non-uniform memory access - NUMA) se poravnava sa fizičkim NUMA čvorom (pridruživanje virtualne utičnice na fizičku utičnicu).
- 5) Distribucija niti: Ako je broj procesora na virtualnoj mašini veći od broja fizičkih niti na jednoj utičnici, virtualne mašine se mogu raširiti na više utičnica.
- 6) Min-max resursna optimizacija: Virtualne mašine se pridružuju tako da se minimizuje maksimalna količina rezervisane operativne memorije i broja procesorskih jezgara.

7.6. Verifikacija i analiza prednosti rešenja

Performanse dobijenog rešenja se porede sa referentnom implementacijom da bi se dokazalo da nema negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve *ADMS* sistema. Verifikuju se i analiziraju prednosti rešenja.

8. VIRTUALNO CLOUD ADMS REŠENJE

8.1. Testno okruženje

U odeljku 8.1 dat je opis testnog okruženja koji obuhvata: računarske i softverske komponente, testne šeme i testove.

8.1.1. Računarske i softverske komponente

Za svrhu testiranja napravljen je privatni *Cloud* klaster koji se sastoji od fizičkih servera raspoređenih u dve šasije smeštene u dva ormara i spojena na dve stalne memorije. Svaki od fizičkih servera sadrži četiri osmo-jezgarna *Intel Xeon* procesora sa 64 GB operativne memorije, 292 GB diskom, 10G mrežom i optičkim kanalom. Uvažavajući zahteve za visokom dostupnošću, svi fizički serveri imaju dve mrežne kartice, napajanja, komunikacionu opremu i diskove u redundantnom nizu nezavisnih diskova, V nivoa, konfiguracije 3+1 (na svaka 3 diska ide jedan redundantan). Tabela 2 prikazuje detaljnu specifikaciju računarskih komponenti:

Komponenta	Opis (eng.)
Računar	<p><i>Model: HP BL 660c Gen.8</i></p> <p><i>Processor: 4 x E5-4620v2 (2.6GHz/8core/20MB95W)</i></p> <p><i>Memory: 32 x 16GB (PC3 -149000R)</i></p> <p><i>Network: 2 x HP Ethernet 10Gb 2P 560M Adapter</i></p> <p><i>Network: 2 x HP Flex Fabric 10Gb 2 port 554FLB</i></p> <p><i>Storage: 2 x 146GB 6G SAS 15k</i></p>
Šasija	<p><i>HP Blc 7000</i></p> <p><i>4 x HP 6120XG Blade Switch</i></p> <p><i>2 x HP Blc Flex Fabric 10GB/24port</i></p> <p><i>Flex fabric with 2 x FC 8Gb and 2 x RJ45 SFP modules</i></p> <p><i>2 x HP 32A PDU</i></p>
Menadžment Server	<p><i>Model: HP BL 420c Gen.8</i></p> <p><i>Processor: 2 x E5- 2403</i></p> <p><i>Memory: 2 x 8GB PC3-12800R</i></p> <p><i>Network: HP Flex Fabric 10Gb 2 port 554FLB</i></p>

Komponenta	Opis (eng.)
Ormar	<i>HP 642 1075mm</i> <i>PDU: HP 2 7x C13</i>
Optički Kanal	<i>2 x HP 8/24 Base 16 port enabled switch</i> <i>HP Premier Flex LC/LC 2m cables</i> <i>HP 8Gb SW SFP pack</i>
Stalna memorija	<i>HP 3PAR StoreServ 7200 2-N (Dual Controller)</i> <i>3PAR M6710 300GB 6G SAS15k Hard disk</i>

Tabela 2: Specifikacija računarskih komponenti

Za operativni sistem, svaki od fizičkih servera koristi *Microsoft Hyper-V* instaliran na *Windows server 2012 R2*. *Microsoft IIS 8.5* je korišćen kao web server, dok je *Microsoft SQL Server 2012* korišćen DB server. Sve klijentske mašine su koristile *Windows 7*. Namenski alati su korišćeni za pravljenje šema i generisanje pobude.

8.1.2. Testne šeme

Elektrodistributivna preduzeća se mogu kategorisati na više načina u zavisnosti od broja napajanih korisnika (veličine elektrodistributivne mreže), nivoa pripremljenosti modela elektrodistributivne mreže i liste funkcionalnosti (koja zavisi od nivoa pripremljenosti podataka ali i poslovnih ciljeva preduzeća). U ovoj doktorskoj disertaciji elektrodistributivna preduzeća se kategorišu na: mala, srednja i velika, u zavisnosti od broja napajanih potrošača kao što je prikazano (Tabela 3).

Kategorija	Broj napajanih potrošača
Mala	< 500 000
Srednja	500 000 – 1 000 000
Velika	>1 000 000

Tabela 3: Kategorizacija elektrodistributivnih preduzeća

Jedan od glavnih ciljeva ove doktorske disertacije je da se obezbedi skalabilno ADMS rešenje koje može da se koristi za upravljanje kako malim tako i velikim elektrodistributivnim mrežama. Kako veličina šeme elektrodistributivne mreže može zavistiti od velikog broja parametara u ovoj disertaciji je pretpostavljeno da kompleksnost šeme zavisi od broja napajanih potrošača. Kao polaznu osnovu za ovo

testiranje korišćena je zamišljena šema koja predstavlja elektrodistributivnu mrežu od 78390 potrošača. Sa ciljem da se verifikuje skalabilnost ADMS rešenja, napravljene su dve nove šeme umnožavanjem osnovne šeme za 4 i 32 puta respektivno – mala i velika. Mala šema predstavlja distributivnu mrežu koja napaja ~300 000 potrošača, dok velika šema predstavlja elektrodistributivnu mrežu od ~2 500 000 potrošača. Tabela 4 predstavlja detalje osnovne šeme i njene multiplikacije od 4 i 32 puta:

Šema	Osnovna	Mala	Velika
Broj potrošača	78390	313208	2506144
Nadzemni vod (naizmenične struje)	45435	181296	1450304
Analogni signal	3917	14996	122624
Asinhroni motor	2	8	64
Prekidač	927	3612	29792
Spojnica	61022	243704	1950048
Sabirnica	36	144	1152
Kondenzator	218	864	7072
Strujni transformator	630	2472	20928
Rastavljač	2011	7944	67264
Diskretni signal	43926	174388	1399456
Distribuirani generator	6	16	64
Detektor kvara	6	24	192
Izvod	103	380	3040
Objekat na izvodu	43980	175704	1405568
Osigurač	23036	92016	736128
Impedansa uzemljenja	0	0	0
Induktor	1	0	0
Spojnica (strujni most)	28	48	384
Rastavljač snage	16905	67476	539808
Petersenova prigušnica	1	0	0

Šema	Osnovna	Mala	Velika
Naponski transformator	518	1996	16992
Dvonamotajni transformator	20271	80904	647488
Tronamotajni transformator	38	152	1216
Riklozer	4	16	128
Regulaciona kontrola	233	884	7072
Podešenje releja	70	268	2176
Daljinski upravljana tačka	5296	20724	172256
Sekcionalizeri	2	4	32
Transformatorska stanica	66	256	2368
Odvodnik prenapona	0	0	0
Sinhrona mašina (generator)	52	200	1664
Regulaciona sklopka	91	352	2656

Tabela 4: Specifikacija testnih šema

8.1.3. Testovi

U ovoj doktorskoj disertaciji, pretpostavljeno je da se pobuda elektrodistributivne mreže može svrstati u tri scenarija:

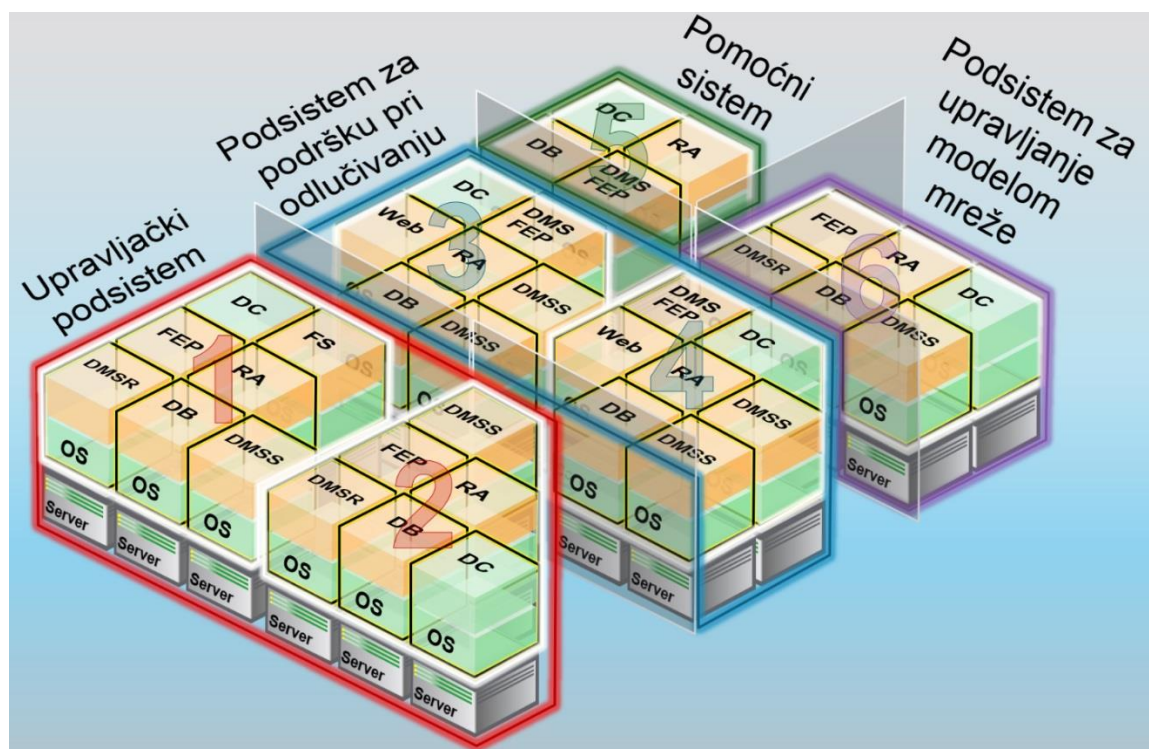
- 1) Stabilno stanje (*eng. Steady State*)
- 2) Stanje visoke aktivnosti (*eng. High Activity*)
- 3) Lavinsko stanje (*eng. Avalanche*)

Fokus testiranja bio je na simulaciji pobude elektrodistributivne mreže u stabilnom stanju i režimu visoke aktivnosti, dok je lavinski scenario kao najkompleksniji za simuliranje van okvira ovog istraživanja. Scenario stabilnog stanja podrazumeva uobičajno ponašanje mreže u kojem se na svakih 5 minuta promeni 50% analognih vrednosti i 10% diskretnih vrednosti, dok scenario visoke aktivnosti podrazumeva promenu 100% analognih vrednosti i 20% diskretnih vrednosti na svakih 5 minuta. Tokom testiranja, diskretne vrednosti su menjane kroz razna stanja dok su analogne vrednosti oscilovale 10%.

Za funkcionalnu i nefunkcionalnu verifikaciju korišćeni su sledeći testovi:

- 1) DMS funkcije: estimacija stanja, proračun tokova snaga, mrežna rekonfiguracija, topološka analiza, itd.
- 2) Infrastrukturni testovi: oporavak u slučaju otkaza, prebacivanje odgovornosti između glavnog i pomoćnog sistema, pokretanje klijentske i serverske aplikacije.
- 3) Tokovi podataka: prikaz diskretnih i analognih SCADA vrednosti, sinhronizacija u realnom vremenu nakon pokretanja i u toku rada sistema, replikacija podataka, sinhronizacija istorijskih podataka, sinhronizacija mrežnog modela, osvežavanje grafičkog prikaza, odaziv na korisničke zahteve.
- 4) Odziv korisničkog interfejsa i osvežavanje: vremena promena statusa, prikaz geografskog pogleda, prikaz transformatorske stranice, vremena analognih promena, kreiranje izveštaja o događajima, osvežavanje geografskog pogleda.
- 5) Konzumiranje računarskih resursa: procesora, operativne memorije, mreže i stalne memorije.

8.2. Identifikacija



Slika 9: Tradicionalno ADMS rešenje

U prvom koraku identifikovano je tipično ADMS rešenje prikazano na slici 9, a koji se sastoji iz skupa funkcionalnih blokova (v. odeljak 6.1), raspoređenih u 2 sistema odnosno 4 podsistema, smeštenih na 37 fizičkih servera.

#	Sistem	Podsistem	Podsistem (eng.)
1	Glavni	Upravljački	<i>Control</i>
2		Podrška pri odlučivanju	<i>Decision Support</i>
3		Upravljanje modelom mreže	<i>Network Model</i>
4	Pomoćni	Pomoćni	<i>Backup</i>

Tabela 5: Identifikovani sistemi i podsistemi

Upravljački podsistem

Upravljački podsistem sadrži jednu zasebnu instancu simulatora polja (*FS*) koja je korišćena za testiranje, dok su svi ostali funkcionalni blokovi upareni u klasterima visoke dostupnosti (*DC, DB, RA, FEP, DMSR, DMSS*) tj. raspoređeni u po dve instance kako bi u slučaju ispada jednog od funkcionalnih blokova (usled otkaza pojedine računarske komponente) postojala još jedna dostupna instanca. Upravljački sistem je namenjen operaterima u kontrolnom centru i pretpostavka je da je kritičan iz aspekta izolacije.

Podsistem za podršku pri odlučivanju

Podsistem za podršku pri odlučivanju se sastoji iz 7 tipova funkcionalnih blokova. *DMSS*, funkcionalni blok za *DMS* simulacije, se sastoji iz 4 nezavisne instance dok se ostali funkcionalni blokovi sastoje iz 2 instance (*RA, DB, DMSR+FEP, DC, WEB*). U ovoj doktorskoj disertaciji se pretpostavlja da sistem za podršku pri odlučivanju nije kritičan.

Podsistem za upravljanje modelom elektrodistributivne mreže

Podsistem za upravljanje modelom elektrodistributivne mreže se sastoji od 6 pojedinačnih instanci (*FEP, RA, DC, DMSR, DMSS, DB*) i nema ni jedan klaster za rad u režimu visoke dostupnosti.

Pomoćni sistem

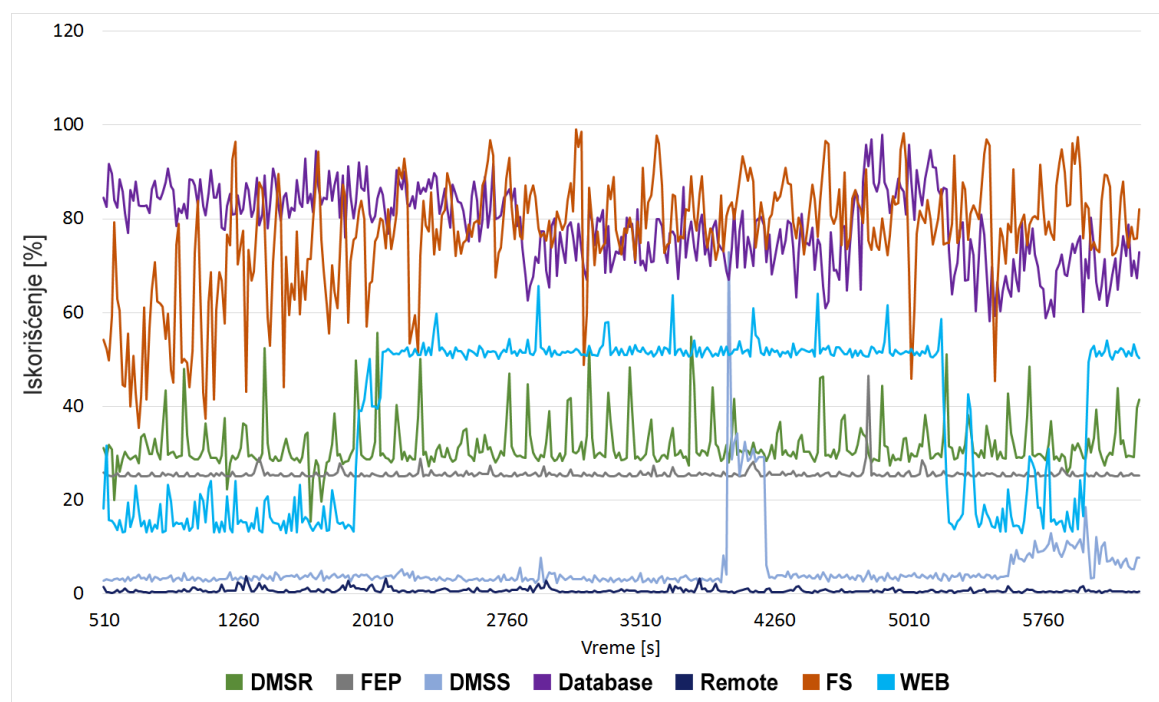
Pomoćni sistem, koji se koristi u slučaju ispada glavnog sistema, se sastoji od 5 funkcionalnih blokova (*DC, DB, RA, DMS+FEP*). U ovom istraživanju postavljen je minimalistički podskup rezervnog sistema sa ciljem da verodostojno optereti ostale podsisteme iz glavnog sistema pa se pretpostavlja da on nema funkcionalne blokove

koji rade u režimu visoke dostupnosti i smatra se nekritičnim (u realnom slučaju korišćenja, pomoćni sistem se smešta na posebnu udaljenu geografsku lokaciju kako bi se smanjila verovatnoća da bude onеспособljen usled katastrofalnog događaja na lokaciji gde se nalazi glavni sistem).

8.3. Profiliranje performansi

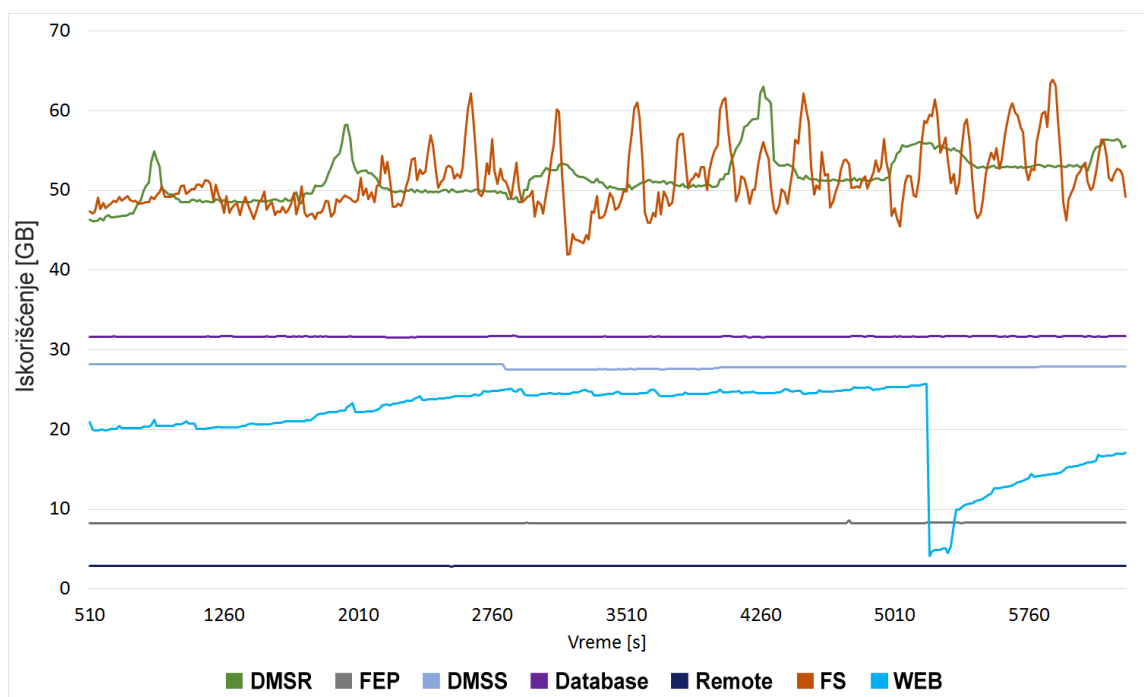
Da bi se prikupili zahtevi za performansama, svaki identifikovani funkcionalni blok smešta se na jednu virtualnu mašinu postavljenu na posebnoj fizičkoj mašini i testira se na dve testne šeme – maloj i velikoj, u dva testna režima – stabilnom stanju i režimu visoke aktivnosti. Tokom testiranja prikupljeno je svih 5 metrika opisanih u tabeli 1. Prvi skup rezultata predstavlja podatke sakupljene tokom testiranja svih funkcionalnih blokova i predstavlja neobrađene podatke. Svi testni rezultati se odnose na simuliranje rada elektrodistributivne mreže u stabilnom stanju na velikoj šemi u trajanju od 5250 sekundi.

Slika 10 prikazuje iskorišćenje procesora tokom testiranja sistema u stabilnom stanju na velikoj šemi. Može se zaključiti da su aktivnosti na funkcionalnom bloku baze podataka veoma visoke što je posledica procesa replikacije podataka. Web funkcionalni blok varira, što je uzrokovano korisničkom interakcijom, dok drugi funkcionalni blokovi ne variraju mnogo.



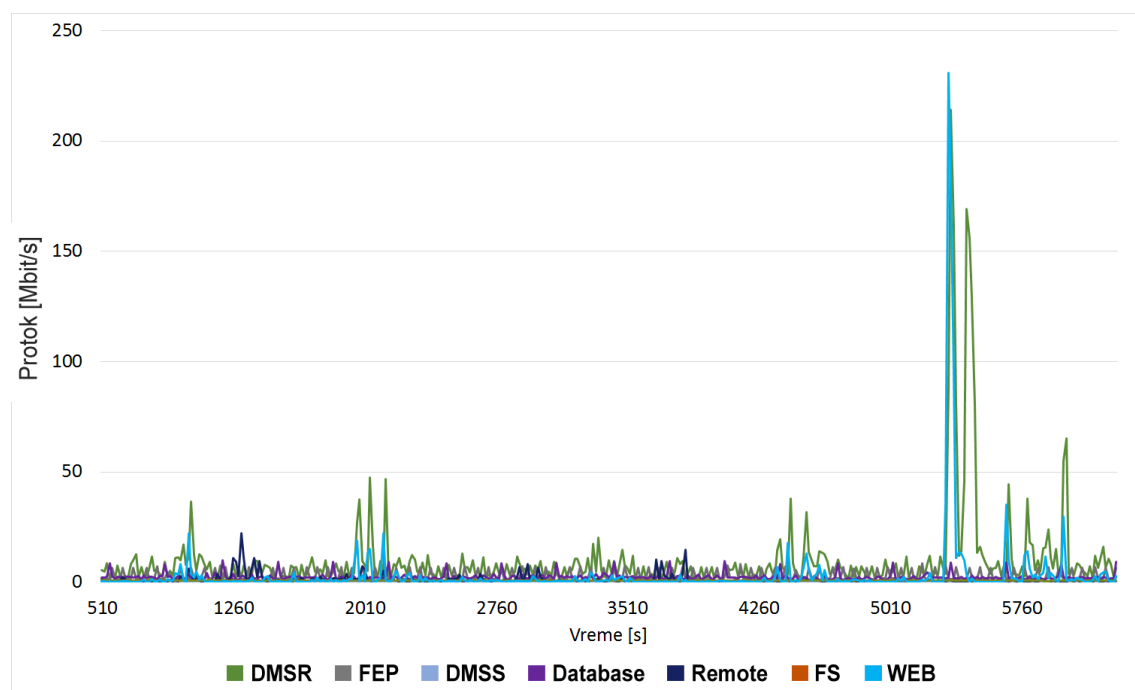
Slika 10: Iskorišćenje procesora

Slika 11 prikazuje iskorišćenje operativne memorije za sve funkcionalne blokove. Može se zaključiti da se *DMSR* i *FS* pokazuju kao memorijski najzahtevniji funkcionalni blokovi, što je i očekivano jer sadrže ceo model mreže. *FS* izvršava testni scenario i generiše pobudu, dok *DMSR* obrađuje pobudu i simultano odgovara na zahteve operatera (sistem testera). *DMSR* i *FS* najviše variraju, pri čemu su ostali funkcionalni blokovi relativno stabilni. Glavni razlog za variranje memorije *DMSR* funkcionalnog bloka je često zauzimanje i oslobađanje memorije, dok *FS* predstavlja prilagođenu verziju *DMS* funkcionalnog bloka. Među poslednjim testovima Web funkcionalnog bloka izvršeno je spuštanje i ponovno pokretanje web servisa što se oslikava naglim padom iskorišćene memorije.



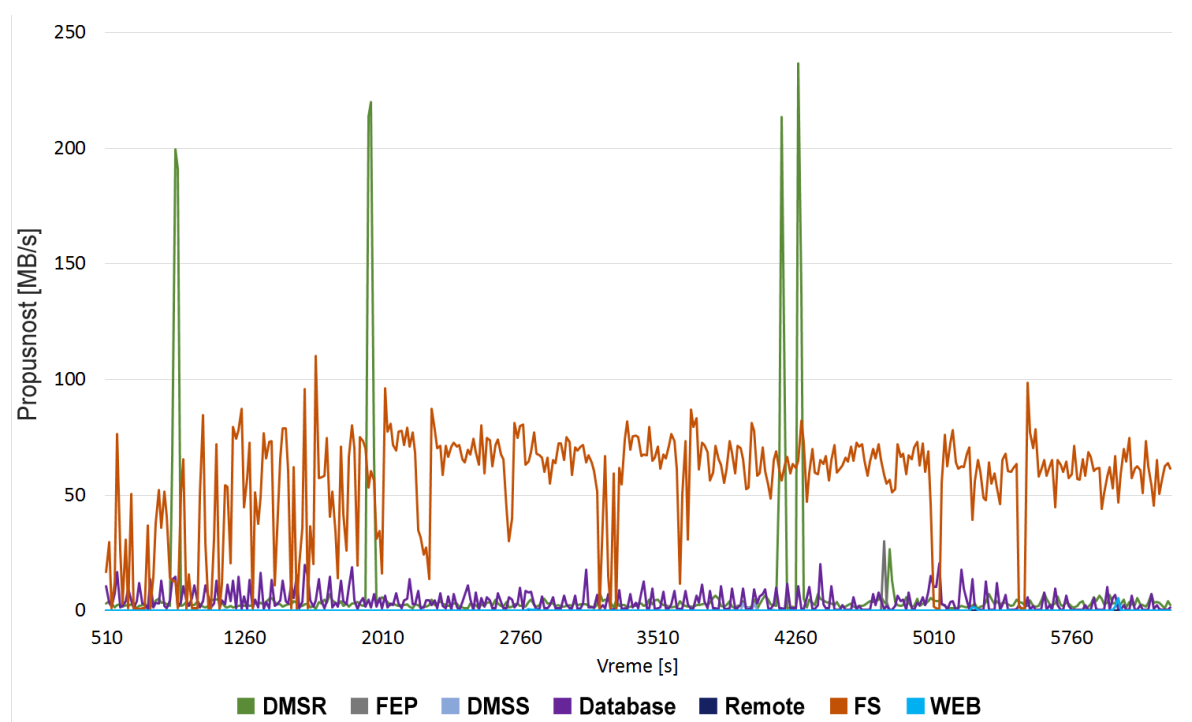
Slika 11: Iskorišćenje operativne memorije

Slika 12 prikazuje mrežni protok za sve funkcionalne blokove. Sa slike se može zaključiti da funkcionalni blokovi *DMSR* i *Web Server* najviše variraju i da *Web* funkcionalni blok dostiže maksimum od ~230.97 Mbit/s, što je uzrokovano povlačenjem celokupnog modela mreže nakon ponovnog pokretanja instance. Drugi funkcionalni blokovi ne prelaze 22.1 Mbit/s.



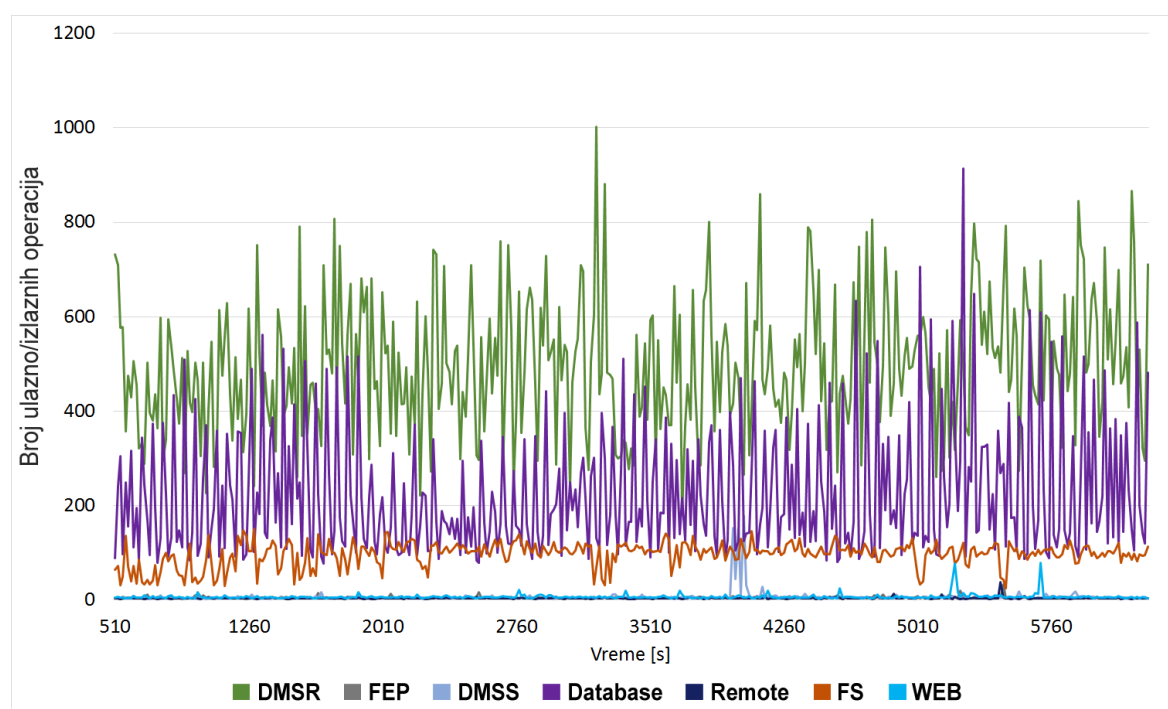
Slika 12: Iskorišćenje mreže

Slika 13 prikazuje protok podataka stalne memorije za sve funkcionalne blokove. Može se zaključiti da FS funkcionalni blok konstantno koristi do 111 MB/s, dok DMS najviše varira i dostiže maksimum od ~236 MB/s, koji je uzrokovan arhiviranjem logova. Ostali funkcionalni blokovi variraju manje i ne prelaze 31 MB/s.



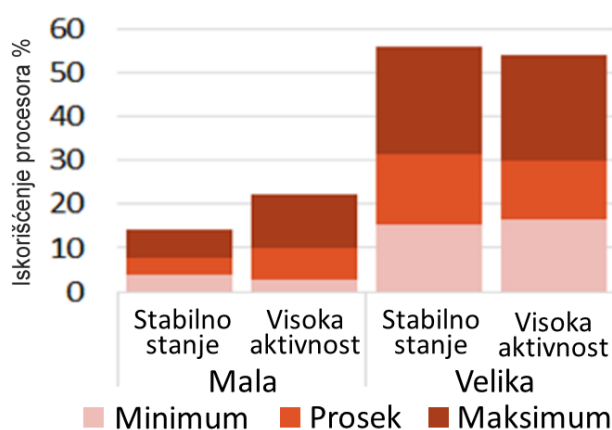
Slika 13: Protok podataka stalne memorije

Slika 14 predstavlja broj ulazno/izlaznih operacija na stalnoj memoriji za sve funkcionalne blokove. Sa slike se može zaključiti da *DMSR* i *DB* funkcionalni blokovi imaju najveći broj ulazno/izlaznih operacija. *DMSR* arhivira logove i podatke, dok *DB* funkcionalni blok preuzima sekvence vremenskih podataka (eng. *Time Series*) i događaja u sistemu. Broj ulazno/izlaznih operacija za *DMSR* u proseku iznosi ~494, a maskimalno dostiže ~1002, dok za *DB* u proseku je ~224, a maksimalno dostiže ~914. Uzimajući u obzir da je protok na stalnoj memoriji oba funkcionalna bloka mali, može se zaključiti da se saobraćaj sastoji iz malih paketa podataka. Takođe može se zaključiti da *FS* funkcionalni blok ima relativno stabilan broj ulazno/izlaznih operacija i protok na stalnoj memoriji.



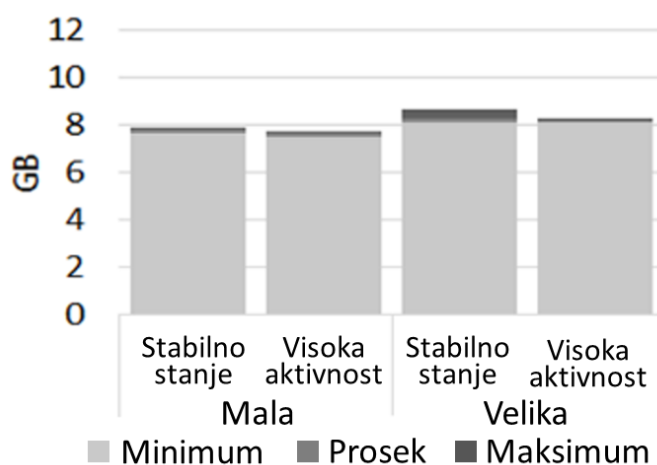
Slika 14: Broj ulazno/izlaznih operacija stalne memorije

Prilikom obrade podataka prikupljenih preko metrika performansi (Tabela 1) posebna pažnja posvećena je varijansama između srednjih i maksimalnih vrednosti. Slike 15 i 16 ilustruju dva reprezentativna primera odstupanja metrike performansi nad određenim funkcionalnim blokom. Slika 15 prikazuje minimalne, srednje i maksimalne vrednosti iskorišćenja procesora *DMSR* funkcionalnog bloka za malu šemu, veliku šemu u dva testna scenarija stabilnog stanja i visoke aktivnosti. Na slici 15 se vidi da maksimalna vrednost procesora značajno varira od srednje vrednosti u sva četiri slučaja tj. nezavisno od šeme i režima testiranja, što je i očekivano jer tester i *FS* funkcionalni blok proizvode sekvence događaja koje se obrađuju i od kojih svaka može nositi različitu količinu obrade. Može se videti i da prosečna vrednost iskorišćenja procesora iznosi ~30% kao i da nikad ne dostiže maksimum što je bio i jedan od osnovnih ciljeva dizajna.



Slika 15: Varijacije iskorišćenja procesora za *DMSR*

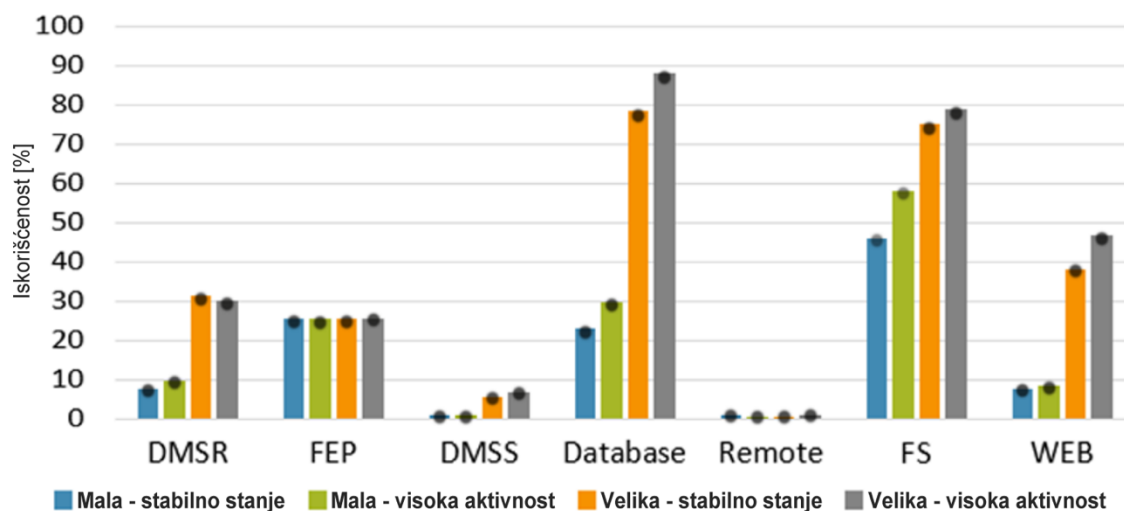
Sa druge strane, na slici 16 prikazano je iskorišćenje operativne memorije od *FEP* funkcionalnog bloka koje ne varira i predstavlja stabilan nivo zauzeća zbog statičke alokacije modela za prikupljanje podataka.



Slika 16: Varijacije iskorišćenja operativne memorije za *FEP*

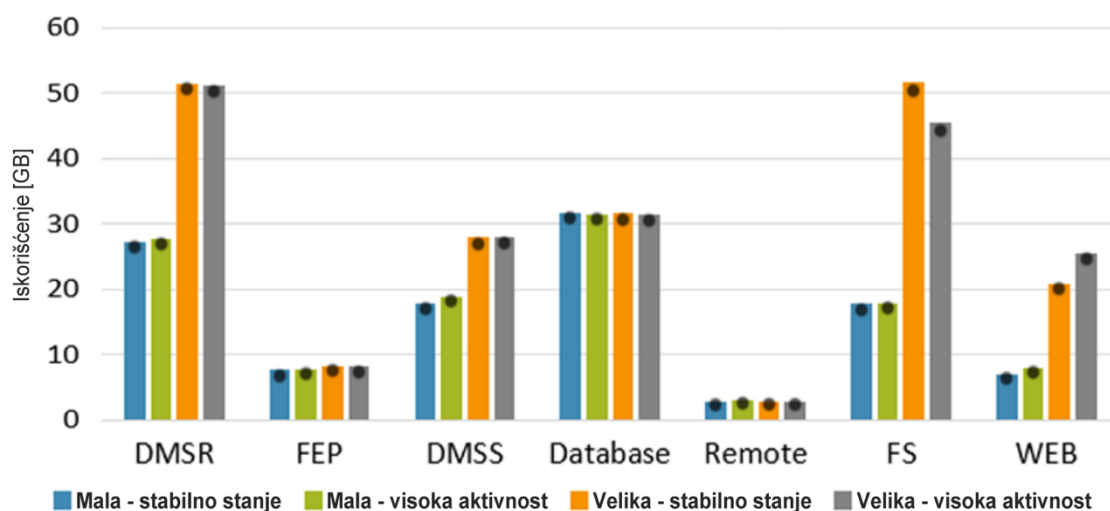
Prethodno predstavljene rezultati su korišćeni kao osnova za pravljanje kataloga virtualnih mašina i njihovo pridruživanje fizičkim računarima. Slike 17-21 predstavljaju srednje vrednosti 5 ključnih metrika performansi prikupljenih tokom perioda testiranja. Svaka od slika predstavlja vrednosti jedne metrike performansi funkcionalnih blokova za dva testna scenarija sprovedna nad dve testne šeme. Prve četiri slike sastoje se od stubova i tačaka, dok se poslednja koja predstavlja resurs mreže sastoji samo od stubova. Stubovi predstavljaju sračunate srednje vrednosti na osnovu prikupljenih kontinualnih podataka tokom testiranja u virtualnom okruženju, dok tačke predstavljaju procenu metrika performansi u fizičkom okruženju koja se dobija relativnim umanjnjem za dodatne troškove virtualizacije koji su ustanovljeni tokom istraživanja.

Slika 17 predstavlja srednje vrednosti procesora. Na slici je očevidno da ni jedan funkcionalni blok ne dostiže maksimalno zauzeće procesora što je potvrda pravilnog rukovanja kapacitetom. Može se zaključiti i da veličina šeme ima ključnu ulogu u određivanju procesorskog opterećenja za *DMSR*, *DB*, *FS* i *WEB* funkcionalne blokove, pri čemu su *DB* i *FS* najzahtevniji.



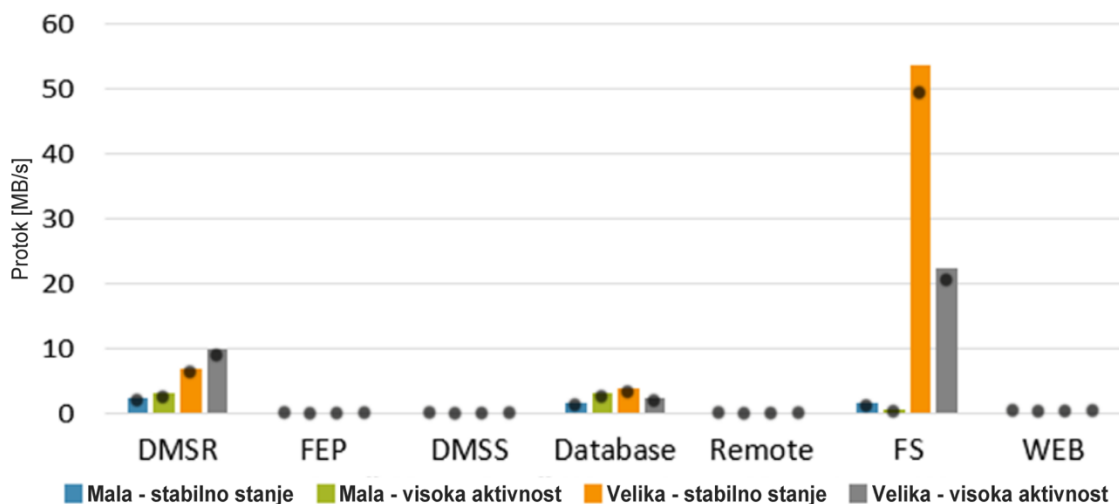
Slika 17: Prosečno iskorišćenje procesora

Slika 18 prikazuje iskorišćenje operativne memorije. Može se zaključiti da su *DMSR* i *FS* funkcionalni blokovi najzahtevniji u korišćenju operativne memorije i njihov maksimum je sličan, što je i očekivano jer *FS* funkcionalni blok predstavlja prilagođenu verziju *DMSR* funkcionalnog bloka.

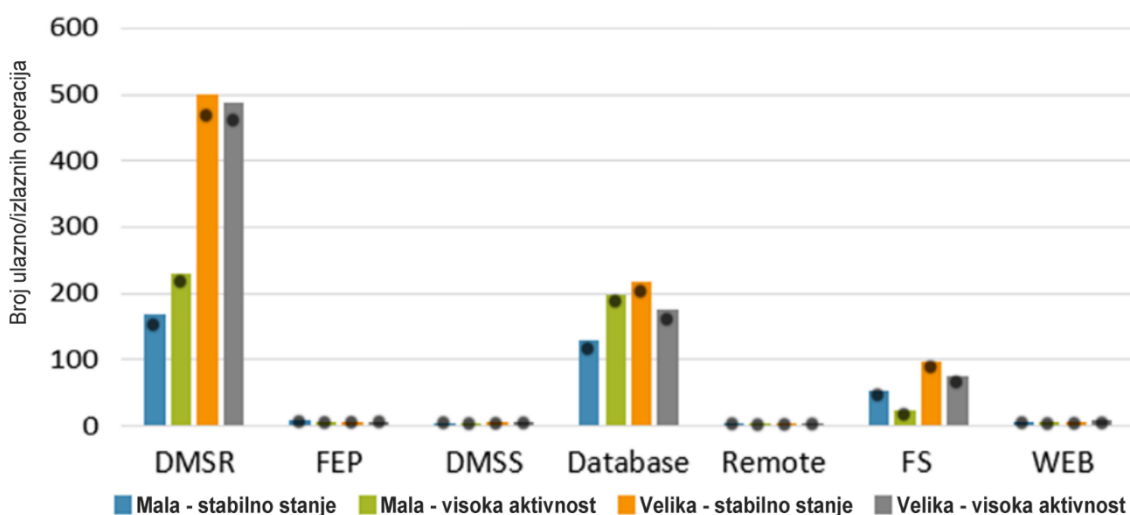


Slika 18: Prosečno iskorišćenje operativne memorije

Metrike performansi stalne memorije prikazane su na slikama 19 i 20. Slika 19 prikazuje propusnu moć stalne memorije, dok slika 20 predstavlja broj ulazno/izlaznih operacija. Na slikama se može zaključiti da su najzahtevnije po korišćenju stalne memorije *DMSR*, *DB* i *FS*. Takođe može se zaključiti da se *DMSR* saobraćaj na stalnoj memoriji sastoji od mnogo malih blokova, dok *FS* funkcionalni blok dostiže maksimum na ~54 MB/s.

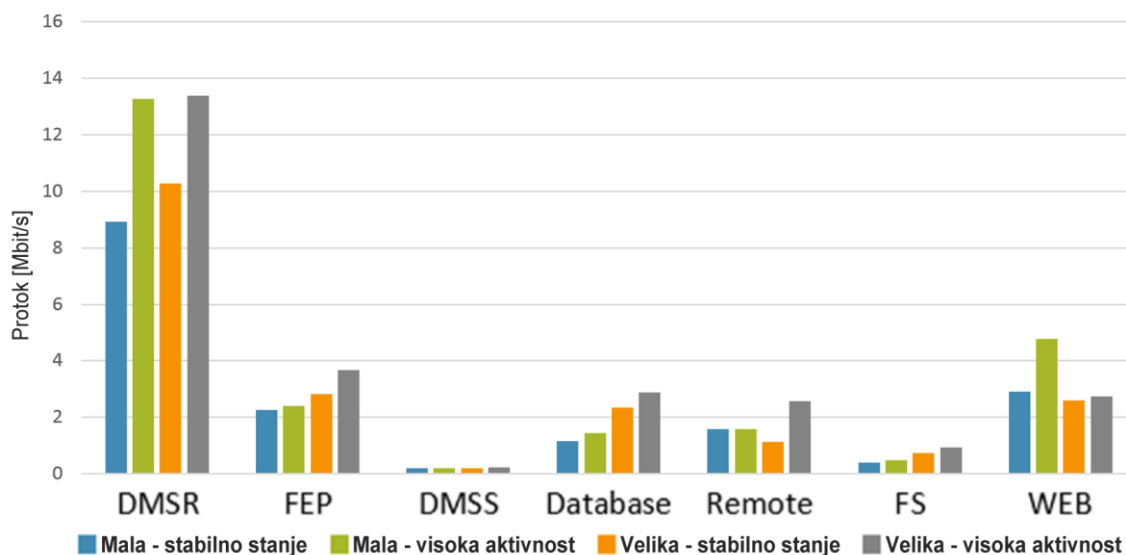


Slika 19: Prosečni protok podataka stalne memorije



Slika 20: Prosečni broj ulazno/izlaznih operacija stalne memorije

Slika 21 predstavlja metrike performansi mrežnog protoka. Može se zaključiti da je *DMSR* funkcionalni blok najzahtevnije koristi mrežne resurse, dok su ostali blokovi zanemarljivi. Prilikom merenja dodatnih troškova virtualizacije, merenja na virtualnom i fizičkom okruženju su oscilovala do 30%, pa nije bilo mogućnosti da se precizno izoluje dodatni trošak virtualizacije.



Slika 21: Prosečno iskorišćenje mreže

Konačno može se zaključiti *ADMS* memorijski i procesorski zahtevna aplikacija dok je korišćenje mrežnih resursa zanemarljivo kao i da uvođenje virtualizacije unosi dodatne troškove 2-8%.

8.4. Pravljenje kataloga virtualnih mašina

Za svaki od identifikovanih i profiliranih funkcionalnih blokova, zabeležene su minimalne, srednje, i maksimalne vrednosti, kao i varijacije između srednje i maksimalne vrednosti. Na osnovu metrika zabeleženih tokom profiliranja, napravljen je katalog od 8 tipskih virtualnih mašina predstavljenih u tabeli (Tabela 6).

Tip virtualne mašine	Funkcionalni i blokovi	Broj procesorskih jezgara	Operativna memorija [GB]	Disk [GB]	Broj
A	DC	2	8	160	6
B	FEP	4	24	160	3
C	DMSS	4	128	160	7
D	DMSR, DMSR+FEP	32	128	160	3 + 3
F	RA	4	32	160	6
G	Web	8	32	160	2
H	FS	8	64	160	1
I	DB	4	32	160+500	6

Tabela 6: Katalog virtualnih mašina

Za svaki od 8 tipova virtualnih mašina specificirani su lista mapiranih funkcionalnih blokova, broj procesorskih jezgara, detalji o diskovima i broj instanci. Princip dodatne rezerve je primenjen na najkritičnije funkcionalne blokove *DMSR* i *FEP*. Iskorišćenje procesora i memorije lako dostiže maksimum, pa su oba resursa na svim virtualnim mašinama statički definisani. Dinamička konfiguracija je primenjena na resurse mreže i stalnu memoriju, jer je njihovo iskorišćenje značajno ispod ukupnog kapaciteta. Virtualna mreža visokih performansi je primenjena za sve virtualne mašine.

8.5. Rezervacija servera

U posmatranom ADMS rešenju, koje je korišćeno kao polazna osnova identifikovana su 2 različita sistema odnosno 4 podsistema koja treba da budu izolovana. Prema principu izolovanog servera za svaki od četiri podsistema neophodan je minimalno po jedan fizički izolovan server, tj. ukupno je neophodno najmanje četiri servera. Dodatno, podsistemima za upravljanje i podršku u odlučivanju, identifikovani su klasteri za rad u režimu visoke dostupnosti koji zahtevaju po jedan dodatni server,

pa je ukupan broj servera šest. Za potrebe ovog istraživanja, korišćene su dve stalne memorije, jedna izolovana za upravljački podsistem i druga za ostale podsisteme.

Uobičajeno, pomoćni (pod)sistem se smatra kritičnim i smešta se na lokaciji sa posebnom elektroenergetskom i komunikacionom infrastrukturom kako bi u slučaju katastrofalnog događaja preuzeo upravljanje elektrodistributivnom mrežom i tehnološki omogućio poslovni kontinuitet. On može predstavljati podskup glavnog sistema (tj. da ima jedan pomoćni podsistem) ili u sveobuhvatnom slučaju biti kompletna replika glavnog sistema.

8.6. Pridruživanje virtualnih mašina

U ovoj aktivnosti cilj je da se 6 fizičkih mašina (koje se međusobno ne razlikuju) rezervisanih u prethodnom koraku metodologije, raspoređi na 4 podsistema za Upravljanje, Podršku pri odlučivanju, Pomoćni i Upravljanje modelom, koji se označavaju respektivno sa S1, S2, S3, S4 i njima pridruži 37 virtualnih mašina. Prvo se šest fizičkih mašina (*eng. Physical Machine - PM*) koje se međusobno ne razlikuju i koje se označavaju sa PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6 raspoređuju na ADMS sisteme S1; S2; S3; S4, koji se razlikuju. Sada se primenjuje raspoređivanje (*v. odeljak 5.2*) 6 objekata, koji se ne razlikuju, u 4 kontejnera koji se razlikuju i nema praznih kontejnera. Ukupan broj mogućnosti se dobija tako što se u vrsti

PM1 PM2 PM3 PM4 PM5 PM6

između svaka dva simbola PM_i postavi ili ne postavi pregrada, tako da bude ukupno tri pregrade jer je time skup mašina podeljen na 4 sistema.

Na primer:

PM1 PM2 | PM3 PM4 | PM5 | PM6

označava da su dve mašine PM1 i PM2 dodeljene sistemu S1, PM3 i PM4 sistemu S2, PM5 sistemu S3 i PM6 sistemu S4. Od pet mesta između simbola u nizu PM1 PM2 PM3 PM4 PM5 PM6 mogu se odabrati tri mesta na koje se postavlja pregrada ukupno na $C_3^5 = \binom{5}{3} = 10$ načina, što su kombinacije od 5 elemenata treće klase bez ponavljanja, od kojih samo jedna od njih (navedena u prethodnom primeru) ispunjava uslove broja fizičkih mašina po sistemima koji proizilaze iz zahteva za režimom rada u visokoj dostupnosti sistema tj. da sistemi S1 i S2 imaju po dve fizičke mašine a sistemi S3 i S4 po jednu fizičku mašinu.

U drugom koraku pridruživanja, zadatak je da se virtualne mašine rasporede po principu fizičke segregacije, tj. da se:

- 1) Na fizičke mašine PM1 i PM2 koje pripadaju S1 rasporede virtualne mašine 2A, 2B, 2D, 2F, 2I, 2C, H.
- 2) Na fizičke mašine PM3 i PM4 koje pripadaju S2 rasporede virtualne mašine 2A, 2D, 2F, 2G, 2I, 4C.
- 3) Na fizičku mašinu PM5 koja pripada S3 rasporede virtualne mašine A, D, F, I.
- 4) Na fizičku mašinu PM6 koja pripada S4 virtualne mašine A, B, C, D, F, I.

Kod pridruživanja virtualnih mašina fizičkim računarima vodi se računa o pravilnom rukovanju kapacitetom računara, distribuciji niti i poravnanju procesora. Prilikom računanja broja jezgara na fizičkom nivou, ravnopravno su računata i *HyperThreading* procesorska jezgra.

U sistemima S3 i S4 postoji samo jedan način da se virtualne mašine pridruže na jednu njima dodeljenu fizičku mašinu, pa se pridruživanje na tim sistemima smatra završenim.

U trećem koraku pridruživanja grupišu se virtualne mašine koje ne smeju biti na istoj fizičkoj mašini kako bi se obezbedio rad sistema u režimu visoke dostupnosti po principu distribucije partnera.

- 1) Virtualne mašine 2A, 2B, 2D, 2F, 2I sistema S1, se raspoređuju na fizičke mašine PM1 i PM2, tako da po jedna instanca od svake virtualne mašine bude na jednoj fizičkoj mašini. Pri tome ostaju neraspoređene: 2C i H.
- 2) Fizičkim mašinama PM3 i PM4 sistema S2, dodeljuju se virtualne mašine 2A, 2D, 2F, 2G, 2I, tako da na svakoj fizičkoj mašini bude po jedna instanca virtualne mašine. Pri tome ostaju neraspoređene: 4C.

U četvrtom koraku pridruživanja, preostale mašine se raspoređuju tako da se postigne optimizacija minimizovanja zauzete operativne memorije i minimizovanje najvećeg broja zauzetih procesorskih jezgara na računaru (po principu Min-max optimizacije) pa se:

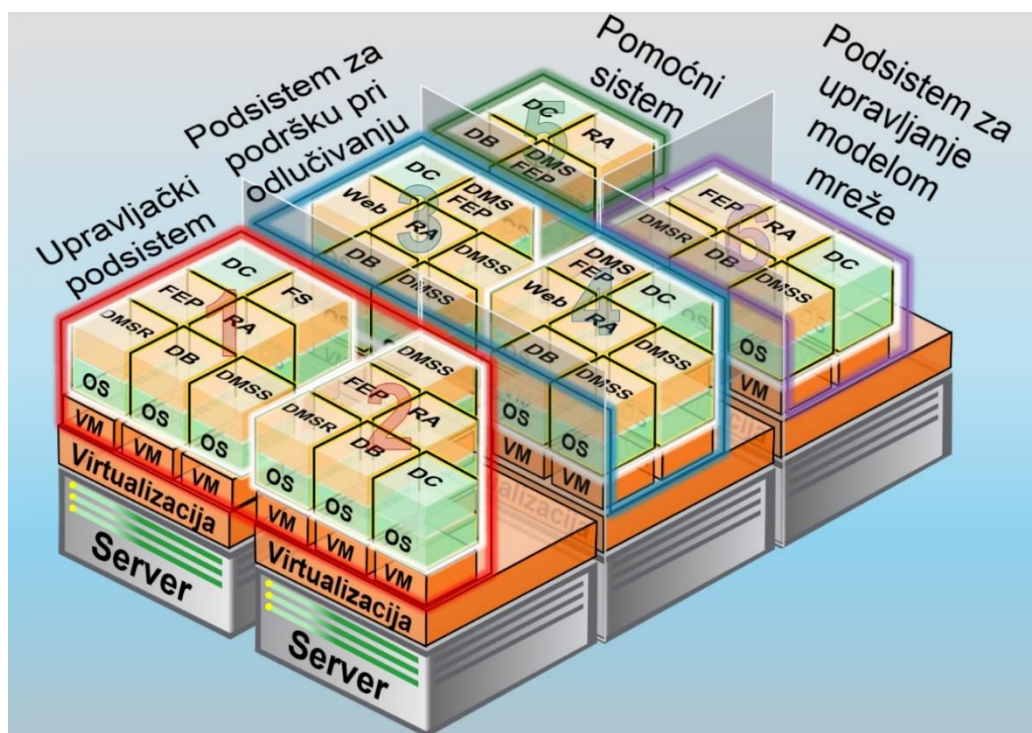
- 1) Na upravljački sistem 2C i H, raspoređuju da po jedna C virtualna mašina se dodeli svakom od fizičkih mašina PM1 i PM2, dok se H mašina može staviti na bilo koji od fizičkih računara.
- 2) Na sistemu za podršku pri odlučivanju, 4C mašine se raspoređuju tako da na svaku od fizičkih mašina se smesti po dve virtualne mašine tipa C.

Rezultujući raspored predstavlja virtualnih i fizičkih mašina izgleda kao što je prikazano u tabeli 7.

Sistem	Računar	Odvojenost	Distribuiranost	Optimizacija	
Upravljački (S1)	1	2A,2B,2D,	A,B,D,F,I	2C, H	A,B,D,F,I,C,H
	2	2F,2I,2C,H	A,B,D,F,I		A,B,D,F,I,C
Podrška pri odlučivanju (S2)	3	2A,2D,2F,	A,D,F,G,I	4C	A,D,F,G,I,2C
	4	2G,2I,4C	A,D,F,G,I		A,D,F,G,I,2C
Pomoćni (S3)	5	A,D,F,I	A,D,F,I	A,D,F,I	
Upravljanje modelom mreže (S4)	6	A,B,C,D,F,I	A,B,C,D,F,I	A,B,C,D,F,I	

Tabela 7: Pridruživanje virtualnih mašina

Rezultat ovog koraka je da su funkcionalni blokovi tradicionalnog ADMS rešenja zasnovanog na 37 fizičkih računara, migrirani na 37 virtualnih mašina, smeštenih na 6 računara (Slika 22), uvažavajući zahteve za: 1) minimizacijom broja računara, 2) otpornosti na otkaze, 3) fizičkom izolacijom sistema, 4) Min-max optimizacijom računarskih resursa, što je zasnovano na kombinatornim pretraživanjima iz poglavlja 5.

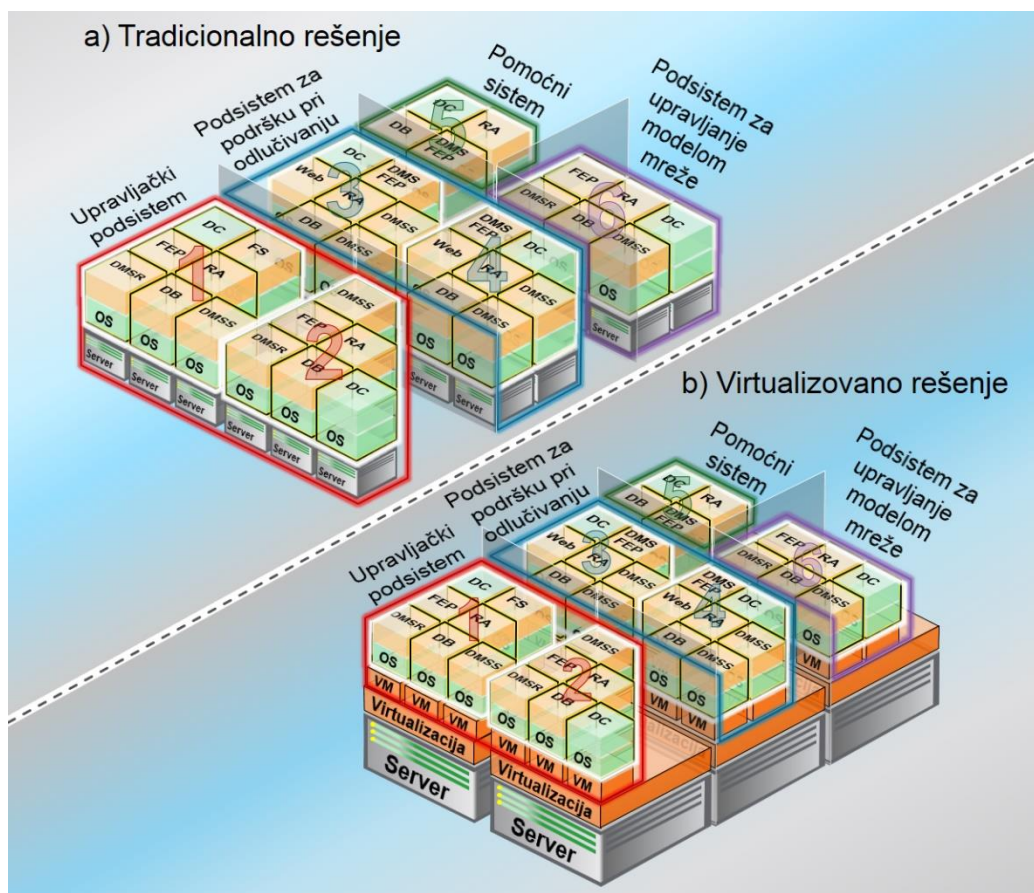


Slika 22: Virtualno ADMS rešenje

8.7. Verifikacija i analiza poboljšanja

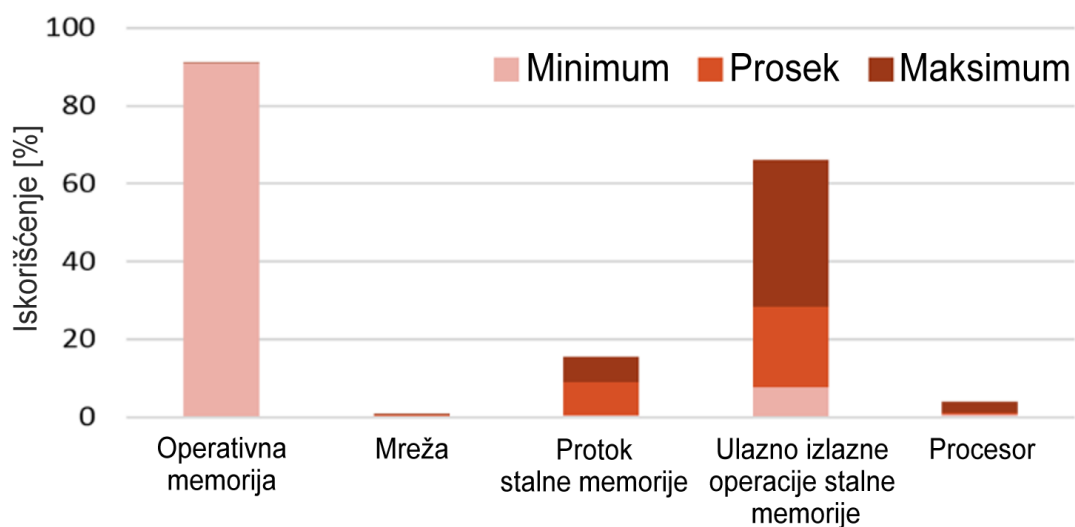
Nakon što je urađeno pridruživanje funkcionalnih blokova virtualnim mašinama i njihovo smeštanje na fizičke mašine, u svrhu verifikacije ispravnosti ADMS rešenja ponovljeni su isti test scenariji kako bi se dokazalo da nema negativnih uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema. ADMS sistem je testiran dva sata, izvršeno je ~200 testova koji verifikuju DMS funkcije, infrastrukturu, tokove podataka, odzive korisničkog interfejsa, resursnu iskorišćenost itd. Tokom verifikacionog procesa, svi testovi su prošli uspešno, bez uočavanja negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve ADMS sistema, što je dokazalo ispravnost virtualnog rešenja.

Testiranjem je pokazano da ADMS sistem zasnovan na Cloud infrastrukturi od 6 fizičkih servera (slika 23b) može da postigne ekvivalent tradicionalnog HPC rešenja od 37 fizičkih servera (slika 23a).



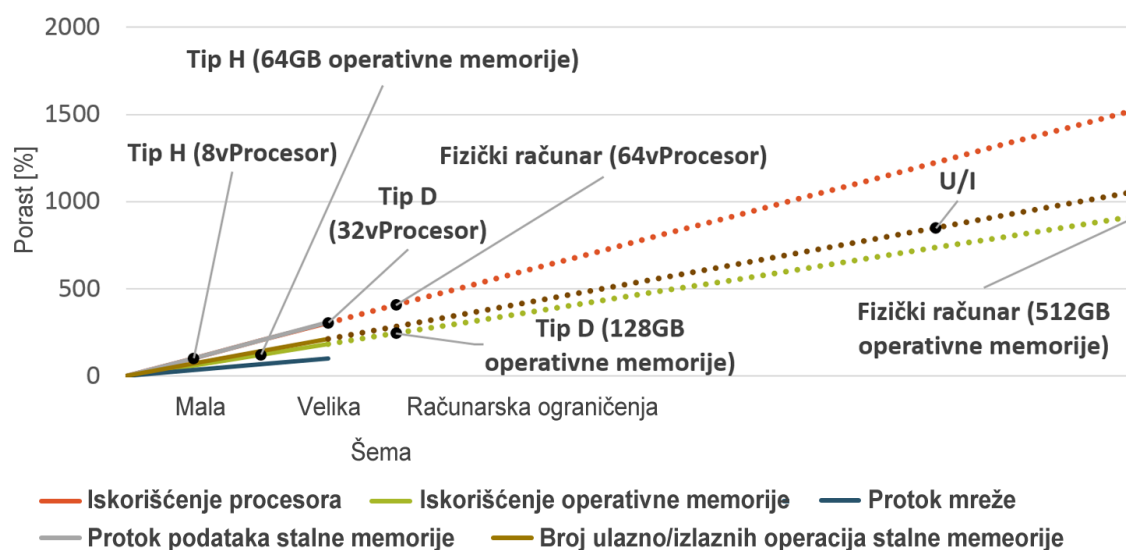
Slika 23: Tradicionalno i Virtualno ADMS rešenje

Slika 24 prikazuje opterećenje fizičke mašine. Može se uvideti da je operativna memorija u proseku jedini značajno iskorišćen resurs dok mreža i procesor ne dostižu značajniji procenat iskorišćenja što je i bio jedan od glavnih ciljeva dizajna. Maksimalni mrežni protok je oko ~30 Mbits/s što je značajno manje od dostupnih 20 Gbits i očekivani jer komunikacija sa uređajima u polju je visoko optimizovana dok je pobuda generisana od strane operatera distribuirana kroz nekoliko instanci. Iskorišćenje stalne memorije pokazuje najveću varijansu, koja se i dalje nalazi unutar dostupnog kapaciteta.



Slika 24: Iskorišćenje resursa na fizičkoj mašini

Jedno od ključnih pitanja je granica do koje ova arhitektura može biti skalirana. Slika 25 pokazuje relativni odnos trendova performansi za *DMSR* kao najkritičniji funkcionalni blok, za svih pet metrika performansi. Početna referentna tačka je vrednost opterećenja za nisko opterećenu mašinu tipa D (Tabela 6) za malu šemu. Pun deo linije za svaku od metrika, predstavlja interpoliranu vrednost metrika performansi, dok tačkasti deo predstavlja ekstrapolirani deo metrika performansi. Ova slika je zasnovana na pretpostavci da je linearan rast kompleksnosti, što predstavlja najbolji mogući slučaj za procenu budućih zahteva performansi. Tri grupe ograničenja su prikazane velikim tačkama. Prva tačka predstavlja ograničenje nametnuto korišćenjem virtualne mašine tipa H. Druga tačka predstavlja ograničenje nametnuto korišćenjem virtualne mašine tipa D za veliku šemu, dok treća predstavlja ograničenje fizičke mašine (uz pretpostavku da je svako *HyperThreading* jezgro računato kao 30% kapaciteta od fizičkog jezgra). Opterećenje mrežnih resursa ne dolazi ni blizu kapaciteta pa nije prikazano u ekstrapoliranom prikazu, ali treba imati u vidu da buduće arhitekture pametnih mreža mogu uključiti integracije sa drugim sistemima kao što su sistemi za rukovanje pametnim brojilima (*eng. MDM*) i pametnim kućama koji mogu značajno uticati na povećanje zahteva za mrežnim resursima. Takođe može se videti da kapacitet protoka podataka stalne memorije prevazilazi zahteve *DMSR* funkcionalnog bloka. Na osnovu izloženog može se zaključiti da virtualno *ADMS* rešenje uspešno radi za malu i veliku šemu, kao i da jednom kad se dostignu ograničenja fizičke mašine neophodno je rearhitekturisanje *ADMS* rešenja sa ciljem potpunog distribuiranja, što je van opsega ovog istraživanja.



Slika 25: Trendovi iskorišćenja resursa

Tabela 8 predstavlja listu prednosti postignutih virtualizacijom *ADMS* rešenja. Iz nje se može videti da su postignute sve očekivane prednosti navedene u poglavlju 1. Procentualno izražena poboljšanja su dobijena intervjuom korisnika sistema.

#	Prednost	Opis
1.	Konsolidacija	Broj fizičkih mašina je smanjen sa 37 na 6 bez negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema.
2.	Brže vertikalno skaliranje	Vreme potrebno za proširenje kapaciteta <i>DMS</i> i <i>Web</i> instanci smanjeno je za 75%.
3.	Brže horizontalno skaliranje	Vreme potrebno za rezervaciju novih <i>Web</i> i <i>Simulacionih</i> instanci smanjeno je za 75%.
4.	Povećana otpornost	Vreme potrebno za oporavak jednog od partnera koji radi u režimu visoke dostupnosti smanjeno je za 75%.
5.	Brža rezervacija instanci	Vreme potrebno za rezervaciju pojedinačnih <i>simulacionih</i> i <i>web</i> instanci smanjeno je za 75%.
6.	Brža rezervacija podsistema	Vreme potrebno za rezervaciju dodatnih sistema za <i>trening dispečera</i> , <i>testiranje</i> i <i>kontrolu kvaliteta</i> je smanjeno za 50%.
7.	<i>Cloud</i> Podrška	Tehničko omogućenje podrške za smeštanje <i>ADMS</i> -a u virtualna <i>Cloud</i> okruženja.
8.	Automatizacija i orkestracija	<i>Cloud</i> infrastruktura, softverski definisano okruženje, omogućuje automatizaciju i orkestraciju.

Tabela 8: Prednosti virtualnog *ADMS* rešenja

9. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja je bio da se ispita mogućnost migracije *ADMS-a*, sa kritičnom misijom, koja obuhvata aplikativne pakete za upravljanje u realnom vremenu i autonomnom režimu rada sa povremenim poravnanjem na *Cloud* infrastrukturu bez negativnog uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema. Ova disertacija predlaže metodologiju za pravljenje virtualnog *ADMS* rešenja zasnovanog na *Cloud* infrastrukturi (*eng. IaaS*).

U prvom koraku dizajna arhitekture odabrana je tipična tradicionalna arhitektura i identifikovane su ključne karakteristike (funkcionalni blokovi, sistemi, podisistemi, klasteri visoke dostupnosti, itd.). Svaki od funkcionalnih blokova je profiliran i izmerene su njegove performanse u 5 metrika (iskorišćenje procesora, zauzeće operativne memorije, protok mreže, protok i broj ulazno/izlaznih operacija na stalnoj memoriji). U drugom koraku, predloženo je virtualno *ADMS* rešenje zasnovano na *Cloud-u*, gde se svaki od funkcionalnih blokova koji je tradicionalno smešten na jednu fizičku mašinu, smešta na jednu virtualnu mašinu. Predloženo rešenje arhitekture je verifikovano na stvarnoj računarskoj platformi, sa distributivnim mrežama realnih veličina (~300 000 potrošača i ~2 500 000 potrošača) u dva testna scenarija (stabilnom stanju i visoke aktivnosti) i pokazano je da nema negativnih uticaja na funkcionalne i nefunkcionalne zahteve sistema.

Ključni doprinos u ovoj disertaciji je migracija produkcionog *ADMS* rešenja kritičnog za operativno vođenje elektrodistributivne mreže zasnovanog na zajedničkoj *OT* platformi (koji uključuje aplikacije za upravljanje u realnom vremenu i u autonomne režimu sa povremenim poravnanjem) na *Cloud IaaS* rešenje koje ima sledeće prednosti: smanjenje broja fizičkih servera, uvažavanje fizičke segregacije sistema, skraćenje vremena potrebnog za oporavak u slučaju otkaza, smanjenje vremena potrebnog za pokretanje novih instanci, upotreba *Cloud* okruženja, omogućenje automatizacije i orkestracije sistema.

Prikazani rezultati testiranja obuhvataju neobrađena merenja zauzeća procesora, operativne memorije, mreže, protoka podataka stalne memorije i broja ulazno/izlaznih operacija stalne memorije za ključne funkcionalne blokove *ADMS* sistema. Takođe su prikazani statistički obrađeni podaci koji obuhvataju srednje vrednosti merenih performansi za velike i male mreže koje rade u stabilnom režimu i režimu visokih aktivnosti, kao i reprezentativni primeri varijacije srednjih i maksimalnih vrednosti.

U primeru korišćenom u evaluaciji, predložena arhitektura je postigla smanjenje fizičkih mašina sa 37 na 6, čak i pri korišćenju konzervativnih pridruživanja i statičkih resursa za kritične funkcionalne blokove. Vreme oporavka nakon ispada, vreme

potrebno za operacije vertikalnog i horizontalnog skaliranja je smanjeno takođe za 75%, dok je vreme rezervacije celih podsistema ubrzano za 50%.

Buduća istraživanja treba da se fokusiraju na multidimenzionalnu optimizaciju resursa, ispitivanje mogućnosti dinamičke dodele virtualnih resursa, iskorišćenje modernih kontejnerskih tehnologija i razvoj bezbednosnih rešenja. Posebnu pažnju pri budućim istraživanjima treba pridati bezbednosnim aspektima *ADMS* rešenja u virtualnom *Cloud* okruženju. Potrebno je ispitati i mogućnost primene platforme za analitiku i mašinska učenja koja u *Cloud* računarstvu mogu da rezervišu i koriste neograničen računarski kapacitet po potrebi.

LITERATURA

- [1] G.T. Heydt, "The Next Generation of Power Distribution Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 225-235, 2010.
- [2] M. Kezunovic, J. D. McCalley, and T. J. Overbye, "Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, Special Centennial Issue, pp. 1329–1341, May 2012.
- [3] R. C. Dugan et al., "Distribution System Analysis to Support the Smart Grid," *IEEE PES Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2010.
- [4] V. Madani et al., "Distribution Automation Strategies Challenges and Opportunities in a Changing Landscape," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 2157–2165, Jul. 2015.
- [5] D. E. McNair et al., "Voices of Experience: Insights into Advanced Distribution Management Systems," U.S. DoE issue 159, pp. 1-63, Feb. 2015.
- [6] A. P. Sakis Meliopoulos et al., "Advanced Distribution Management System," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2109–2117, Dec. 2013.
- [7] Jeremy Carden; Dragan Popovic, "Closed-Loop Volt/Var Optimization: Addressing Peak Load Reduction", *IEEE Power and Energy Magazine*, Year: 2018, Volume: 16, Issue: 2, Pages: 67 – 75. ISSN: 1540-7977.
- [8] N. Popovic, D. Popovic and I. Seskar, "A Novel Cloud-Based Advanced Distribution Management System Solution," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. PP, no. 99, pp.1-8.doi:10.1109/TII.2017.2780060.
- [9] J. Rittinghouse and J. Ransome, "Cloud Computing Implementation, Management, and Security," CRC Press, 2010.
- [10] R. C. Green et al., "Applications and Trends of High Performance Computing for Electric Power Systems: Focusing on Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 922–931, Jun. 2013.
- [11] E. Roloff et al., "High Performance Computing in the Cloud: Deployment, Performance and Cost Efficiency," *IEEE Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci.*, pp. 371–378, 2012.
- [12] S. Bera et al., "Cloud Computing Applications for Smart Grid: A Survey," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 1477–1494, May 2015.
- [13] G. C. Deka, "Cost-Benefit Analysis of Datacenter Consolidation Using Virtualization," *IT Prof.*, vol. 16, no. 6, pp. 54–62, 2014.
- [14] J. Gibson et al., "Benefits and Challenges of Three Cloud Computing Service Models," *4th Int. Conf. on Comput. Asp. Soc. Networks*, pp. 198–205, 2012.

-
- [15] N. Popović, M. Popović: Jedno rešenje distribuirane topološke analize za rad u realnom vremenu, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2011, Vol. 1, No 12, pp. 2806-2809.
- [16] N. Kovački: Distribuirani proračuni tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2011, Vol. 1, No 14, pp. 3377-3380.
- [17] N. Nedić: Upravljanje tokovima aktivnosti u distributivnom menadžment sistemu, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [18] Selakov, A. Optimalno upravljanje mikro mrežama u karakterističnim radnim režimima (doktorska disertacija), 2017.
- [19] Krsman, Vladan D., and Andrija T. Sarić. "Verification and estimation of phase connectivity and power injections in distribution network." *Electric Power Systems Research* 143 (2017): 281-291.
- [20] Krsman, Vladan D., and Andrija T. Sarić. "Bad area detection and whitening transformation-based identification in three-phase distribution state estimation." *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 9, pp 2351-2361, 2017.
- [21] Vukmirović S., Erdeljan A., Lendak I., Čapko D.: A novel software architecture for Smart Metering systems, *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, 2010, Vol. 2010, No 12, pp. 937-941, ISSN 0022-4456.
- [22] Vukmirović S., Erdeljan A., Čapko D., Lendak I., Nedić N.: Optimization of workflow scheduling in Utility Management System with hierarchical neural network, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2011, Vol. 4, No 4, pp. 672-679, ISSN 1875-6883.
- [23] D. S. Popovic: "Power Application - A Cherry on the Top of the DMS Cake", DA/DSM DistribuTECH Europe 2000, Vienna, Austria, October 10-12, 2000, Specialist Track 3, Session 3, Paper 2.
- [24] D. S. Popovic, D. D. Bekut, V. P. Treskanica: "Specialized algorithms for DMS analysis and optimisation", University of Novi Sad, Serbia, 2003. 404 pages.
- [25] D. S. Popovic, R. M. Ciric: "A Multi-Objective Algorithm for Distribution Networks Restoration", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.16, No.3, Jul. 1999, pp. 1134-1141.
- [26] A. Janjić, D. S. Popović: "Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach", *IEEE Trans. on Power Systems* Vol. 22, No. 2, pp 597-604 May 2007.
- [27] D. S. Popović, E. Varga, Z. Perlić: "Extension of the Common Information Model with a Catalog of Topologies", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, No. 2, pp 770-777 May 2007.

-
- [28] D. S. Popovic, Z. N. Popovic, "A Risk Management Procedure for Supply Restoration in Distribution Networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, No.1, pp. 221-228, February 2004.
- [29] X. Fang et al., "Evolving Smart Grid Information Management Cloudward: A Cloud Optimization Perspective," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 111–119, Mar. 2013.
- [30] X. Fang et al., "Managing Smart Grid Information in the Cloud: Opportunities, Model, and Applications," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 4, pp. 32–38, Jul.-Aug. 2012.
- [31] F. Luo et al., "Cloud-Based Information Infrastructure for Next-Generation Power Grid: Conception, Architecture, and Applications," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1896–1912, Jul. 2016.
- [32] Y. W. Chen and J. M. Chang, "EMaaS: Cloud-Based Energy Management Service for Distributed Renewable Energy Integration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2816–2824, 2015.
- [33] C. Alcaraz et al., "Managing Incidents in Smart Grids a la Cloud," in *Proceedings - 2011 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science, CloudCom 2011*, 2011, pp. 527–531.
- [34] B. Genge, A. Beres, and P. Haller, "A Survey on Cloud-based Software Platforms to Implement Secure Smart Grids," in *49th International Universities Power Engineering Conference*, 2014.
- [35] D. Wu et al., "Preserving Privacy of AC Optimal Power Flow Models in Multi-Party Electric Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 2050–2060, Jul. 2016.
- [36] F. Ma et al., "Cloud Computing for Power System Simulations at ISO New England - Experiences and Challenges," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2596–2603, Nov. 2016.
- [37] Y. Simmhan et al., "Cloud-Based Software Platform for Big Data Analytics in Smart Grids," *Computing in science & Engineering*, vol.15. no 4. Pp 38-47, 2013.
- [38] Y. Xin et al., "Virtual Smart Grid Architecture and Control Framework," *2011 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2011*, pp. 1–6, 2011.
- [39] Rosić, D. Model kontrole pristupa u Smart Grid sistemima. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad. 2017.
- [40] Achieving IT/OT integration with AMI, distribution automation & management solutions; Aqeel Ahmed; Chuck Roy; 2016 Saudi Arabia Smart Grid (SASG); Year: 2016; Pages: 1 – 8;
- [41] Large scale storm outage management; D. Lubkeman; D. E. Julian; *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.; Year: 2004; Pages: 16 - 22 Vol.1;

- [42] Fuzzy logic approach to predictive risk analysis in distribution outage management; Po-Chen Chen; Mladen Kezunovic; IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2827-2836, 2016.
- [43] A. Selakov, D. Bekut, A.T. Saric, "A novel agent-based microgrid optimal control for grid – connected, planned island and emergency island operations," *Internacional Transaction on Electrical Energy Systems*, vol.26, no. 9, pp. 1999-2022, 2016.
- [44] Comprehensive Real-Time Microgrid Power Management and Control With Distributed Agents; C. M. Colson; M. Hashem Nehrir; IEEE Transactions on Smart Grid; Year: 2013, Volume: 4, Issue: 1; Pages: 617 – 627; Cited by: Papers (60) | Patents (1);
- [45] Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration; Kristin Dietrich; Jesus M. Latorre; Luis Olmos; Andres Ramos; IEEE Transactions on Power Systems; Year: 2012, Volume: 27, Issue: 1; Pages: 20 – 29; Cited by: Papers (121);
- [46] Emerging distribution systems: Modeling challenges in faulted conditions; Luka Strezoski; Marija Prica; Kenneth A. Loparo; 2017 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC); Year: 2017; Pages: 1 – 6;
- [47] Joshua Mangerson, John Rafferty, Sean Yazbeck, FIELD CREW MANAGEMENT SYSTEM AND METHOD; US Patent Apps 14/052,760,2015 Google Patents; Publication date: April 16, 2015
- [48] Guest Editorial: Special Section on Asset Management in Smart Grid; Shay Bahramirad; Amin Khodaei; Julia Matevson; Zuyi Li; Lina Bertling; Essa Aleksy Passo; Mahmud Fotuhi-Firuzabad; IEEE Transactions on Smart Grid; Year: 2015, Volume: 6, Issue: 2; Pages: 953 – 954; Cited by: Papers (3);
- [49] Rade Doroslovački, Ivan Stojmenović i Ratko Tošić, Generating and Counting Triangular System, BIT 27 (1987) 18-24.
- [50] Rade Doroslovački, Principi algebre opšte, diskretne i linearne, FTN Novi Sad, Edicija tehničke nauke, 2012. ISBN 978-86-7892-431-6 Algebra COBISS.SR-ID 273803783.
- [51] F. Xu et al., "Managing Performance Overhead of Virtual Machines in Cloud Computing: A Survey, State of the Art, and Future Directions," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 1, pp. 11–31, Jan. 2014.
- [52] K. Ye et al., "Profiling-Based Workload Consolidation and Migration in Virtualized Data Centers," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 878–890, Mar. 2015.
- [53] "NERC CIP Standards." <http://www.nerc.com/Pages/default.aspx>. [Datum pristupa: 27.02.2018].

BIOGRAFIJA I BIBLIOGRAFIJA AUTORA

Biografija

Nemanja D. Popović rođen je 07. juna 1987. godine. Diplomski-master rad iz oblasti distribuirane topološke analize odbranio je 2011 godine na departmanu za Računarstvo i automatiku, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Od 2011.godine do danas zaposlen je u kompaniji „*Schneider Electric DMS NS*“, prvo kao inženjer, razvojni pa glavni starji, zatim kao rukovodilac tima i naposljetku kao rukovodilac službe za SaaS, gde se i sada nalazi. Angažovan je i na Fakultetu tehničkih nauka kao asistent sa nepunim radnim vremenom na predmetu Cloud Computing u elektroenergetskim sistemima. Godine 2011. upisao je doktorske studije na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije, na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Dobitnik je nagrade kompanije „*Schneider Electric DMS NS*“ za najvrednijeg radnika u 2016. godini.

Bibliografija

1. Popović N.: JEDNO REŠENJE DISTRIBUIRANE TOPOLOŠKE ANALIZE ZA RAD U REALNOM VREMENU, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2011, Vol. 1, No 12, pp. 2806-2809, ISSN 0350-428X, UDK: 004.3

2. N. Popovic, D. Popovic and I. Seskar, "A Novel Cloud-Based Advanced Distribution Management System Solution," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. PP, no. 99, pp.1-1.doi:10.1109/TII.2017.2780060