

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ



Мр Олга М. Ристић

ДИНАМИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА
ПРЕВЕНТИВНИХ ЕКСПЛОАТАЦИОНИХ
АКТИВНОСТИ У АНАЛИЗАМА ПОУЗДАНОСТИ
ЕЛЕКТРИЧНЕ ОПРЕМЕ

Докторска дисертација

Чачак, 2016.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ	
I Аутор	
Аутор: Мр Олга Ристић, проф. технике и информатике	
Датум и место рођења: 11.10.1974. год., Чачак	
Наслов магистарске тезе: Програмска механичка испитивања елемената далеководне мреже	
Датум и место одбране магистарске тезе: 04.07.2006. год., Факултет техничких наука, Чачак	
Област магистарске тезе: Мехатроника	
Садашње запослење: Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука у Чачку	
II Докторска дисертација	
Наслов: Динамичко моделовање и симулација превентивних експлоатационих активности у анализама поузданости електричне опреме	
Број страница: 101	
Број слика: 59	
Број библиографских података: 105	
Установа и место где је рад израђен: Факултет техничких наука у Чачку	
Научна област (УДК): 621.31:(004.94+004.9)(043.3)	
Ментор: Др Владица Мијаиловић, редовни професор	
III Оцена и одбрана	
Датум пријаве теме: 11.09.2013. год.	
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Владе Урошевић, ред. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Примењене рачунарске науке и информатика, преседник 2. Др Данијела Милошевић, ванр. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Информационе технологије, члан 3. Др Александар Ранковић, ванр. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Електроенергетски системи, члан 4. Др Братислав Иричанин, доцент Електротехнички факултет, Београд Област: Примењена математика, члан 5. Др Владица Мијаиловић, ред. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Електроенергетика, ментор 	
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Владе Урошевић, ред. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Примењене рачунарске науке и информатика, преседник 2. Др Данијела Милошевић, ванр. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Информационе технологије, члан 3. Др Александар Ранковић, ванр. проф. Факултет техничких наука, Чачак Област: Електроенергетски системи, члан 4. Др Братислав Иричанин, доцент Електротехнички факултет, Београд Област: Примењена математика, члан 	
Датум одбране дисертације:	

РЕЗИМЕ

Предмет дисертације је моделовање и симулација понашања електричне опреме током планског експлоатационог периода ради развоја модела за динамички прорачун показатеља поузданости и техничко - економску процену ефеката појединих видова и мера у склопу превентивног одржавања.

Установљено је да је учестаност кварова веома ниска за већину електричне опреме током првих 10 - 20 година погона, а да она расте током каснијег периода експлоатације. Због тога се превентивне активности планирају за сваку годину појединачно.

Полазна основа ове дисертације је репрезентативна међународна статистика о кваровима на електричној опреми. Све анализе су урађене за енергетски трансформатор на прагу дистрибутивне мреже, чија поузданост је од посебног значаја за непрекидност напајања потрошача електричном енергијом. Трансформатор је „разложен“ на функционалне целине, а поузданост сваке од њих је моделована мешавином експоненцијалне и *Weibull*-ове расподеле. Такође, зависно од степена оштећења, дефинисане су три категорије кварова, сходно времену које је потребно за њихово отклањање.

За стварне вредности параметара опреме, спровођења активности и испоручене електричне енергије, применом развијеног модела установљени су тренуци и обим активности и мера које су оправдане за примену на свакој компоненти енергетског трансформатора. Потврђено је да се може постићи наизглед контрадикторан ефекат, да се смање трошкови превентивног одржавања, а да при томе дође до повишења нивоа расположивости. Осим конвенционалних мера превентивног одржавања, анализиран је утицај уградње система за континуални надзор, набавка резервне опреме и спровођење ревитализације енергетског трансформатора. Анализа комбиноване примене мера и активности показује да се набавка најскупљих елемената у потпуности може избећи, док се неке могу применити у каснијем периоду експлоатације, омогућавајући максимално снижење експлоатационих трошкова и продужење животног века постојеће опреме.

Ради потпуности модела, приказан је значај различитих врста симулација у анализама поузданости система. Као најчешће коришћена, описана је секвенцијална Monte Carlo симулација којом се симулира настанак кварова електричне опреме и дат је модел утицаја екстремних временских прилика на одржавање опреме која је инсталисана на отвореном простору.

Применом софтверског алата *Vensim PLE* развијен је модел превентивних експлоатационих активности динамичких система. Метода за симулацију динамичких система (*System Dynamics Simulation - SDS*) је примењена на формирање модела општег система одржавања коришћењем дијаграма узрочних петљи и дијаграма токова. Извршено је моделовање и симулација минималних и максималних трошкова одржавања енергетског трансформатора.

Предложени модел за динамичку анализу превентивних активности енергетског трансформатора је софтверски реализован у програмском језику *Java*.

SUMMARY

The subject of the thesis is modeling and simulation of electrical equipment during the planned exploitation period aimed to develop dynamic model for reliability analysis and technical and economic assessment of preventive maintenance effects.

Very low frequency of failures for most of electrical equipment was established in the first 10–20 years of exploitation as well as an increase in failure occurrence over the later period. Therefore, prevention activities are planned annually.

The starting point of this thesis is the representative international statistics of electrical equipment failures. All analyses were done for the power transformer at the boundary of the distribution network, whose reliability is very important for continuous electricity supply. Transformer is ‘decomposed’ to functional units, and the reliability of each unit was modelled with mixture of exponential and *Weibull*’s distribution. Also, depending on the damage degree, three categories of failures were established, based on time required for their removal.

Time of performance and scope of activities as well as measures reasonable apply to each component of the power transformer were specified in terms of actual cost of the equipment, the implementation of activities and electricity supply using the developed model. It has been confirmed that seemingly contradictory effects can be produced, i.e. costs of preventive maintenance will be reduced and availability increased. In addition to conventional measures of preventive maintenance, the influence of installing continuous monitoring system, spare parts supply and revitalisation of the power transformer were analysed. The analysis of the combined application of measures and activities shows that the supply of the most expensive elements can be avoided, while some can be used in the later period of exploitation, which enables maximum reduction in maintenance costs and lifetime extension of the existing equipment.

The importance of different types of simulations in the system reliability analysis has been shown here. Most commonly employed Sequential Monte Carlo simulation, used to simulate the occurrence of electrical equipment failures, as well as the model of the impact of extreme weather on maintenance of the equipment installed outside are showed in the thesis.

The dynamic system model for preventive maintenance activities was developed by using *Vensim PLE* software tools. *System Dynamic Simulation (SDS)* method was applied to model general system maintenance using causal loop diagrams and flow charts. Modeling and simulation of minimum and maximum maintenance costs of the power transformer was performed.

The software for the proposed dynamic model analysis of activities relative to preventive maintenance of the power transformer was developed using the *Java* programming language.

САДРЖАЈ

САДРЖАЈ	1
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	3
1.1 Значај поузданости електроенергетске опреме	3
1.2 Утицај развоја информационих технологија на поузданост електроенергетске опреме	4
1.3 Организација докторске дисертације	5
2. ПРИКАЗ ИСТРАЖИВАЊА У СВЕТУ	7
2.1 Моделовање процеса одржавања	7
2.2 Преглед развоја софтверских алата за анализу поузданости	11
3. МЕТОДЕ АНАЛИЗЕ ПОУЗДАНОСТИ	15
3.1 Увод	15
3.2 Карактеристичне функције у анализама поузданости	16
3.3 Одређивање показатеља поузданости из података у току експлоатације.....	18
3.4 Расподеле вероватноћа у анализама поузданости.....	20
3.4.1 Експоненцијална расподела	20
3.4.2 Weibull-ова расподела	21
3.4.3 Мешавина расподела	22
3.5 Модел мрежних структура	22
3.5.1 Редна веза.....	23
3.5.2 Паралелна веза	23
3.6 Аналитичке методе за анализу поузданости.....	24
3.7 Стратегије одржавања система	27
4. ДИНАМИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ ЕФЕКТА ПРЕВЕНТИВНИХ АКТИВНОСТИ	31
4.1. Увод	31
4.2 Дефиниција и модел стања	31
4.2.1 Модел стања елемената	32
4.3 Најзначајнији кварови који настају на енергетским трансформаторима.....	33
4.3.1 Модел кварова за групу трансформатора	34
4.4 Развој модела превентивних активности на енергетском трансформатору	35
5. ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНЕ КОМБИНАЦИЈЕ ПОЈЕДИНИХ МЕРА И ПРЕВЕНТИВНИХ АКТИВНОСТИ	42
5.1 Увод	42
5.2 Подаци о трошковима и кваровима енергетских трансформатора	42

5.3 Резултати анализа трошкова и штета применом различитих активности на елементима енергетских трансформатора	46
5.3.1 Случај радијалног напајања потрошача.....	46
6. СИМУЛАЦИЈЕ	50
6.1 Увод	50
6.2 Аналитичка симулација за техничке системе.....	51
6.2.1 Приказ радијалне структуре у облику стабла	52
6.3 Симулација непредвиђених догађаја.....	55
6.3.1 Симулација заштите система помоћу расклопне опреме.....	56
6.3.2 Симулација кварова на заштитним елементима	56
6.4 Monte Carlo симулација	57
6.4.1 Генерисање случајних бројева.....	60
6.4.2 Секвенцијална Monte Carlo симулација.....	61
6.4.3 Monte Carlo симулација случајних стања	63
6.5 Утицај амбијенталних услова на поузданост електричне опреме	64
6.5.1 Симулација временских непогода.....	64
6.5 Постојеће методе за динамичко моделовање и симулацију система	69
6.5.1 Моделовање структуре система применом методе SDS	71
6.5.2 Софтвер за динамичко моделовање система.....	73
6.5.3 Динамички модел система одржавања	76
6.5.4 Дијаграм узрочне петље система одржавања.....	76
6.5.5 Дијаграм тока система одржавања опреме.....	78
6.6 Моделовање и симулација трошкова одржавања енергетског трансформатора	80
6.6.1 Дијаграми узрочне петље и токова трошкова одржавања енергетских трансформатора.....	80
6.6.2 Симулација укупних очекиваних трошкова експлоатације енергетског трансформатора применом Vensim софтвера.....	84
6.7 Развој софтвера за симулацију трошкова одржавања.....	86
6.7.1 Примена JFreeChart библиотеке за креирање графикона.....	87
6.8 Остале методе за симулацију у анализи поузданости	90
6.8.1 Анализа стабла отказа - FTA.....	90
6.8.2 Анализа врста и последица отказа - FMEA.....	91
7. ЗАКЉУЧАК	92
7.1 Увод	92
7.2 Будућа истраживања	93
8. ЛИТЕРАТУРА.....	95

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1 Значај поузданости електроенергетске опреме

Поузданост представља способност система да извршава предвиђену функцију у одређеном временском периоду под задатим условима. Поузданост се мери преко различитих показатеља поузданости као што су: расположивост, неотказивост, интензитет отказа итд. Неки систем се сматра поузданим ако му карактеристични показатељи у обављању одређене функције имају вредности које нису горе од захтеваних.

Ниво поузданости се оцењује на основу потреба корисника функција које систем обавља, што значи да са гледишта неких корисника систем може бити поуздан, а других, који имају веће захтеве, непоуздан.

Неки систем може бити поуздан у обављању једних, а непоуздан у обављању других функција. Поузданост система се може повећати уградњом квалитетније опреме, система за континуални надзор, применом аутоматике, итд. Повећање поузданости углавном захтева додатна материјална улагања, па је потребно одредити технички рационална решења спровођењем техничко - економских анализа које узимају у обзир све наведене факторе [1].

Анализе поузданости се примењују код великог броја техничких система. При овим анализама се могу применити квалитативне и квантитативне методе.

Квалитативне методе за оцену поузданости углавном зависе од искуства и процене инжењера који раде на одржавању опреме.

Квантитативне методе користе статистичке податке из формираних база података о стању опреме, као и методе које се користе за предвиђање стања опреме услед рада и амбијенталних услова под којим опрема ради.

Електроенергетски систем (ЕЕС) се може разложити на четири функционалне целине, и то подсистем за [2]:

- производњу електричне енергије,
- пренос електричне енергије,
- дистрибуцију електричне енергије,
- потрошњу електричне енергије.

Према статистичким подацима великих компанија, око 90% свих прекида напајања потрошача су последица кварова који настају на елементима дистрибутивног система [3]. Основни циљ анализе поузданости је да се утврди обим и редослед активности које треба спровести да би се дужина прекида напајања свела на најмању могућу меру, што је у интересу и испоручилаца електричне енергије, и потрошача. Све активности које се спроводе у циљу повећања поузданости изискују инвестициона улагања од стране испоручиоца електричне енергије [4]. Због тога је неопходно извршити оптимизацију, да би се минимизовали укупни трошкови и штете. Економски аспект анализе поузданости представља одређивање штета које потрошачи трпе због неиспоручене електричне енергије и трошкова и штета које има испоручилац електричне енергије.

У периоду експлоатације неког објекта, укупни трошкови и штете се састоје од [3]:

- инвестиционих трошкова (трошкови изградње постројења, број и врста елемената у зависности од конфигурације);

- експлоатационих трошкова (трошкови превентивног и корективног одржавања). Према досадашњој пракси, превентивно одржавање се изводило у фиксним временским интервалима и најчешће је подразумевало визуелни преглед елемената. Корективно одржавање се спроводило после настанка квара, а трајање отклањања и цена зависили су од степена оштећења и врсте опреме;
- преостале вредности на крају периода експлоатације (зависе од климатских услова, степена преоптерећења, степена извођења превентивног одржавања). Није логично очекивати да ће се два елемента исте старости и исте врсте једнако амортизовати ако раде у различитим климатским условима, са различитим степеном оптерећења и са различитим категоријама потрошача које напајају (овде се мисли на променљивост дијаграма оптерећења);
- штете које трпи испоручилац због неиспоручене електричне енергије (уколико постоји резервни извор напајања онда су ове штете минималне);
- штете које трпи испоручилац због изненадно испале снаге;
- штете коју трпе потрошачи због прекида у напајању електричном енергијом (зависе од структуре потрошачког подручја, дужине трајања прекида, врсте производног процеса и доба дана);
- инвестиционих трошкова у току периода експлоатације (новчана средства за набавку резервне опреме, уградња система за континуални надзор, уградња система за даљинско управљање).

1.2 Утицај развоја информационих технологија на поузданост електроенергетске опреме

Напредак у развоју информационих технологија (ИТ) утицао је у великој мери на поузданост опреме ЕЕС и огледа се у следећем [5]:

- сложени прорачуни, који се раде у реалном времену брже се изводе применом рачунара и софтвера специјално развијених за ту намену,
- детектовање могућности настанка кварова ће бити много ефикасније применом система за континуални надзор,
- јефтина и поуздана мобилна комуникација се може употребити да би се добиле информације о погоршању стања опреме или настанку квара.

Први софтверски алати развијени за анализу поузданости електричне опреме су примењивани на критичне елементе електроенергетске опреме [6]. У овом периоду нису били довољно развијени програмски језици, а мали број информатичара се бавио проблемима поузданости ЕЕС. Најчешће је развој ових алата био у процедурално оријентисаним програмским језицима *Fortran*, *C*, итд.

Већ 1990 - тих година створиле су се веће могућности за развој софтвера са графичким корисничким интерфејсом *GUI (Graphical User Interface)* [7]. За развој софтвера су коришћени објектно - оријентисани програмски језици *Java*, *C++* и *C#*, који омогућавају једноставну интеракцију са корисником апликације.

Крајем прошлог века је развијен велики број софтвера који су се користили за динамичко моделовање и симулацију у системима одржавања. Најчешће коришћени програмски пакети који се користе за динамичко моделовање и симулацију су: *MatLab*, *Modelica*, *Simulink*, *Arena*, *VenSim*, итд [8].

У дисертацији ће бити приказан оригинални динамички модел ефеката спроведених активности у оквиру превентивног одржавања енергетског трансформатора и одређен прецизан редослед примене предложених активности чијим спровођењем се минимизују укупни трошкови и штете у планском периоду експлоатације. За динамичко моделовање и симулацију коришћене су метода *SDS* и софтверски алат *VenSim PLE 6.3* [8].

1.3 Организација докторске дисертације

Рад се састоји од седам поглавља, укључујући Увод и Закључак.

У другом поглављу **Преглед истраживања у свету** дат је преглед најзначајније литературе из области анализе поузданости и одржавања сложених техничких система. Алгоритам који су развили јапански научници Okamura, Dohi и Oasaki [27], користи се за минимизацију укупних трошкова и максимизацију поузданости система. Овај алгоритам представља полазну основу за модел развијен у четвртном поглављу. Са дефинисаним алгоритмом извршиће се побољшање постојеће стратегије одржавања применом задатих функција и прорачун функција према плану одржавања. Основни циљ овог алгоритма је да се добије план одржавања чији су трошкови минимални. Описана је метода динамичког програмирања и предложени тренуци спровођења превентивних активности одржавања сложеног система за сваки појединачни елемент (компоненту) система. Такође, дат је преглед развоја софтвера за анализу поузданости и софтвера који се користе за моделовање и симулацију.

У трећем поглављу су изложени методологија утврђивања критичних догађаја на техничким системима и математички модели за прорачун функција поузданости. Показане су најчешће коришћене расподеле вероватноћа, а које ће иначе бити коришћене за развој динамичког модела у четвртном поглављу. Приказан је модел мрежних структура са посебним освртом на њихов значај у анализи поузданости и описане врсте одржавања и њихова примена на техничким системима различите намене.

У поглављу **Динамичко моделовање ефеката превентивних активности** је приказан модел стања који се користи да би се обезбедиле информације о функционалној исправности опреме. Описани су основни појмови који се односе на промене стања опреме услед промене режима рада. При том је узето у обзир да системи у погледу отклањања кварова могу бити обновљиви и необновљиви. Описани су прелази из једног у друго стање за обновљиве системе. На примеру енергетског трансформатора предложене су мере и активности чијим спровођењем се обезбеђује минималан ниво трошкова и штета током планског периода експлоатације. Свака мера и активност појединачно су моделовани са становишта цене и дужине трајања спровођења и утицаја на параметре поузданости трансформатора. Претраживањем по простору стања утврђена је процедура за одређивање оптималне стратегије експлоатације.

Пето поглавље (**Одређивање оптималних мера и превентивних активности**) је посвећено практичном одређивању оптималне комбинације појединих мера и активности за једну трансформаторску станицу TS 110/x kV/kV, са два енергетска трансформатора од по 31,5 MVA. Анализиране су активности које треба применити за смањење трошкова и штета у периоду експлоатације за случај радијалног напајања потрошача и за случај када потрошачи имају могућност алтернативног напајања.

У поглављу **Симулације** описане су аналитичке и Monte Carlo симулације и њихова примена у анализи поузданости електричне опреме. Аналитичком симулацијом се одређује низ активности које се спроводе после настанка квара на датом систему. Када је у питању реализација Monte Carlo симулације за одређивање показатеља поузданости, значајно је применити више различитих врста процесора за генерисање случајних бројева, како се добијени резултати не би понављали. Као пример, приказани су алгоритми за симулацију настанка и отклањања кварова применом секвенцијалне Monte Carlo симулације. Симулацијом случајних стања утврђују се вероватноће настанка квара за симулиране године. Приказан је алгоритам за симулацију временских непогода које утичу на настанак нежељених догађаја и алгоритам за одређивање највероватнијих временских непогода.

Такође, у раду је приказан општи модел система за одржавање опреме, са две врсте дијаграма: дијаграми узрочних петљи и дијаграми токова. Развијен је модел за прорачун укупних трошкова одржавања применом *Vensim PLE 6.3* софтверског алата. За креиран математички модел превентивних експлоатационих активности енергетског трансформатора реализовани су дијаграм узрочних петљи и дијаграми токова који ће се користити за даљу анализу. Приказана је примена овог софтверског алата за симулацију на примеру укупних очекиваних трошкова енергетског трансформатора при спровођењу различитих активности одржавања.

У објектно оријентисаном програмском језику *Java* развијен је софтвер за прорачун трошкова превентивних активности одржавања за модел дат у четвртом и петом поглављу. Софтвер се може применити на било коју врсту енергетског трансформатора променом дефинисаних параметара у апликацији.

На крају шестог поглавља налази се кратак опис осталих метода које се користе код симулација при анализи настанка кварова.

У последњем поглављу приказани су кључни резултати до којих се дошло. Дати су правци даљих истраживања у области динамичких симулација техничких система.

2. ПРИКАЗ ИСТРАЖИВАЊА У СВЕТУ

2.1 Моделовање процеса одржавања

Зачетницима истраживања у области оптимизације експлоатације техничких система уопште сматрају се Barlow и Hunter који су развили модел за одређивање оптималног тренутка замене елемента који је у експлоатацији [9]. Критеријум оптимизације је био максимум просечне расположивости од тренутка уградње до тренутка замене елемента. Kowada и Bando [10] разматрали су један елемент појединачно са две врсте превентивног одржавања: замена елемента пре настанка квара и корективно одржавање које се спроводи када до квара дође. Они су развили аналитичке изразе за прорачун тренутка спровођења замене којом се максимизира очекивана расположивост. Значајна су истраживања која је вршио Guerts [11]. Истраживао је модел базиран на *Weibull*-овој расподели, при чему је критеријум оптимизације био минимум очекиваних трошкова отклањања кварова. Први динамички модел на основу кога је одређен оптималан тренутак замене елемента развио је Nachlas [2]. Неотказивост елемента моделована је мешавином експоненцијалне и *Weibull*-ове расподеле, а модел је примењен у планирању одржавања путничких авиона.

Истраживања која се надовезују на ова су дата у раду аутора Nguyen и Murthy [12]. Они су разматрали два модела превентивног одржавања са минималним бројем замена елемената. Nakagawa је у радовима [13, 14] дао сличан модел, где је разматрао превентивно одржавање у фиксним временским интервалима. Ови радови су касније коришћени за развој активности превентивних одржавања. Lin и др. су у раду [15] наставили истраживања превентивних активности са циљем смањења настанка и последица кварова. Исти аутори су у [16] дали модел са две врсте кварова. Nakagawa и Mizutani [17] су дали модификацију Nakagawa модела [13, 14] планирањем одржавања у фиксним временским интервалима.

Ради процене оправданости набавке читавих елемената високонапонских постројења на основу минимума очекиваних трошкова и штета развијен је стационарни модел [18, 19]. Показује се да се набавком појединих елемената, за дати концепт напајања потрошача, трошкови и штете које трпи испоручилац електричне енергије могу значајно смањити. У [20 - 23] анализирана је поузданост елемената са расположивом резервом, при чему је време боравка у појединим стањима моделовано експоненцијалном расподелом. Као што је познато, интензитет кварова расте са временом. У [24] пораст интензитета кварова је обухваћен тако што је неотказивост енергетских трансформатора моделована нормалном расподелом, док је за трајање отклањања кварова усвојено да је то детерминистичка величина. У [25] развијен је модел за набавку резервних дистрибутивних трансформатора, при чему је боравак у исправном стању моделован мешавином расподела, а време отклањања квара је моделовано *Weibull*-овом расподелом.

Оптимизацију превентивних активности одржавања разматрали су аутори у раду [26], где је дат математички модел поправљивих сложених система. Стратегија превентивних активности се заснива на подели времена одржавања на три периода. Свака компонента се може одржавати, заменити или се уопште не предузимају превентивне активности. Основни циљ овог модела је да се минимизују укупни

трошкови и максимизује поузданост система. Примењена је метода динамичког програмирања и дат пример сложеног система на ком је за сваки појединачни елемент предложен тренутак извођења превентивних активности одржавања.

У раду јапанских аутора Okamura, Dohi и Osaki [27], описан је модел две различите врсте кварова који одговарају минималном времену поправке и замене применом динамичког програмирања. У овом моделу разматра се систем на коме се изводе минималне поправке и замене елемената. Кварови се деле на две врсте:

- тип I (који захтевају мало време поправке),
- тип II (кварови који захтевају дуже времена за замену елемента на посматраном систему) и решавају се применом динамичког програмирања.

Алгоритам који је описан одређује минималне трошкове применом оптималног плана одржавања и важи за општу врсту модела. Предложени шаблон обезбеђује јединствен оквир за одређивање стратегија превентивног одржавања у фиксним временским интервалима. У скоро свим наведеним радовима, приказани су модели за одређивање оптималних временских периода превентивног одржавања, али нису развијени ефикасни алгоритми.

Са овим алгоритмом се прорачунава оптималан план одржавања којим се минимизирају очекивани трошкови и не зависе од врсте модела. Превентивно одржавање се дели на N временских интервала, при чему се интензитет отказа за обе врсте квара мења са спровођењем превентивних активности за било који временски интервал. Временски интервали су дати у облику: $t_1 < t_2 < \dots < t_N$, где се k - то превентивно одржавање изводи у тренутку t_k . Претпоставља се да се интензитет отказа кварова Типа I и Типа II мења са сваком активности превентивног одржавања. У k - том интервалу превентивног одржавања функција интензитета отказа је за:

Тип I:

$$h_k^I(t|t_{k-1}), \quad 0 \leq t < t_k - t_{k-1} \quad (2.1)$$

Тип II:

$$h_k^{II}(t|t_{k-1}), \quad 0 \leq t < t_k - t_{k-1} \quad (2.2)$$

Функција интензитета отказа у k - том периоду зависи од времена последње превентивне активности t_{k-1} . Усвојена је практично тачна чињеница да је $t_0 = 0$, и овај тренутак се поклапа са тренутком почетка експлоатације елемента, односно система. У моделу се одређују:

$S_k(t_k|t_{k-1})$ - укупни очекивани трошкови и

$T_k(t_k|t_{k-1})$ - очекивана дужина трајања k - тог периода,

под условом је да су спроведене превентивне активности $k-1$ и k у тренутку t_{k-1} и t_k , редом, тако да је:

$$S_k(t_k|t_{k-1}) = c_1 \int_0^{t_k-t_{k-1}} h_k^I(t|t_{k-1}) R_k''(t|t_{k-1}) dt + c_2 R_k''(t_k - t_{k-1}|t_{k-1}) + c_4 (1 - R_k''(t_k - t_{k-1}|t_{k-1})), \quad (2.3)$$

$k = 1, \dots, N-1,$

$$S_N(t_N|t_{N-1}) = c_1 \int_0^{t_N-t_{N-1}} h_N^I(t|t_{N-1}) R_N''(t|t_{N-1}) dt + c_3 R_N''(t_N - t_{N-1}|t_{N-1}) + c_4 (1 - R_N''(t_N - t_{N-1}|t_{N-1})), \quad (2.4)$$

$$T_k(t_k|t_{k-1}) = \int_0^{t_k-t_{k-1}} R_k''(t_k|t_{k-1}) dt, \quad k=1, \dots, N, \quad (2.5)$$

$$R_k''(t_k|t_{k-1}) = \exp\left(-\int_0^t h_k''(s|t_{k-1}) ds\right), \quad 0 \leq t < t_k - t_{k-1} \quad (2.6)$$

где су:

c_1 - трошкови минималне поправке,

c_2 - трошкови превентивног одржавања,

c_3 - трошкови замене,

c_4 - трошкови корективног одржавања,

$R_k''(t_k|t_{k-1})$ - функција поузданости за квар Типа II у k - том периоду.

Очекивана величина трошкова превентивног одржавања у фиксним временским интервалима $\pi_N = \{t_1, \dots, t_N\}$, за укупан број одржавања N је:

$$C(\pi_N, N) = \frac{\sum_{k=1}^N \prod_{l=1}^{k-1} R_l''(t_l - t_{l-1}|t_{l-1}) S_k(t_k|t_{k-1})}{\sum_{k=1}^N \prod_{l=1}^{k-1} R_l''(t_l - t_{l-1}|t_{l-1}) T_k(t_k|t_{k-1})}. \quad (2.7)$$

Са овим моделом су одређени укупни трошкови у неком периоду и дужина трајања превентивних активности за задати временски интервал. Дефинисани су укупни трошкови за спроведену стратегију превентивног одржавања у фиксним временским интервалима.

Проблем у овом моделу био је пронаћи оптималан број временских интервала одржавања N^* и π_N^* који ће минимизовати очекиване трошкове.

Ако се претпостави да је $R_k''(t_k|t_{k-1})=1$, овај модел би био исти као оригинални модел превентивног одржавања у фиксним временским интервалима дат у [13]. Ако се функција интензитета отказа типа I дефинише помоћу функције интензитета отказа за почетни период $h_0'(t)$, онда је:

$$h_k'(t|t_{k-1}) = \beta_k h_0'(t + \alpha_k t_{k-1}). \quad (2.8)$$

Ако се интензитет отказа $h_k'(t|t_{k-1})$ замени са:

$$h_k^{I+III}(t|t_{k-1}) = h_k^I(t|t_{k-1}) + h_k^{III}(t + t_{k-1}), \quad (2.9)$$

овај модел ће одговарати превентивном одржавању у фиксним временским интервалима са непоправљивим кваровима.

У раду [27] је предложен и алгоритам за динамичко програмирање и проналажење оптималног плана одржавања који ће имати минималне трошкове за константно N . Пошто је *Newton*-ов метод нелинеарни оптимизациони алгоритам опште намене, може се понекада десити да проблем минимизације неће конвергирати уколико има пуно улазних параметара.

У проблему минимизације који се решава, променљиве битне за одлучивање $\pi_N = \{t_1, \dots, t_N\}$ имају ограничење $t_1 < t_2 < \dots < t_N$. За овакве секвенцијалне оптимизационе проблеме, искуство показује да примена динамичког програмирања даје најбоље резултате.

Претпоставља се да за оптимални план одржавања π_N^* , постоји минимална

очекивана величина трошкова која се обележава са ρ .

Једначине за минимизацију очекиваних трошкова су:

$$J_k = \min_{t_k} W_k(t_k | t_{k-1}^*, J_1, J_{k+1}, \rho), \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2.10)$$

$$J_N = \min_{t_N} W_N(t_N | t_{N-1}^*, J_1, \rho), \quad (2.11)$$

где су функције: $W_k(t_k | t_{k-1}^*, J_1, J_{k+1}, \rho)$ и $W_N(t_N | t_{N-1}^*, J_1, \rho)$ добијене из једначина:

$$W_k(t_k | t_{k-1}, J_1, J_{k+1}, \rho) = S_k(t_k | t_{k-1}) - \rho T_k(t_k | t_{k-1}) + J_{k+1} R_k''(t_k - t_{k-1} | t_{k-1}) + J_1 (1 - R_k''(t_k - t_{k-1} | t_{k-1})), \quad (2.12)$$

$$W_N(t_N | t_{N-1}, J_1, \rho) = S_N(t_N | t_{N-1}) - \rho T_N(t_N | t_{N-1}) + J_1. \quad (2.13)$$

У претходним једначинама J_k , $k = 1, \dots, N$, називају се функције релативних вредности.

Услови (2.10) и (2.11) представљају потребне и довољне услове за одређивање оптималног плана одржавања.

Проблем се заснива на проналажењу плана одржавања који задовољава једначине оптималности. Овде су коришћене итеративне методе. Овај алгоритам има двоструку улогу: побољшање постојеће стратегије применом датих функција и прорачун функција према плану одржавања. Ова два корака се понављају док се не добије план одржавања чији трошкови конвергирају. Нова стратегија одржавања се базира на следећим функцијама под задатим функцијама релативних вредности J_1, \dots, J_N :

$$W_k(t_k | t_{k-1}, J_1, J_{k+1}, \rho), \quad k = 1, \dots, N-1 \quad (2.14)$$

$$W_N(t_N | t_{N-1}, J_1, \rho). \quad (2.15)$$

Када су J_1, \dots, J_N константне вредности, горње функције неће увек бити конвексне у односу на променљиве одлучивања t_k . Због тога се предложени алгоритам заснива на следећим сложеним функцијама за два узастопна периода, уместо $W_k(\cdot | \cdot)$:

$$\tilde{W}_k(t_k | t_{k-1}, t_{k+1}, J_1, J_{k+2}, \rho) = W_k(t_k | t_{k-1}, J_1, W_{k+1}(t_k | t_{k-1}, J_1, J_{k+2}, \rho), \rho), \quad t_{k-1} \leq t_k \leq t_{k+1}, \quad k = 1, \dots, N-2 \quad (2.16)$$

$$\tilde{W}_{N-1}(t_{N-1} | t_{N-2}, t_N, J_1, \rho) = W_{N-1}(t_{N-1} | t_{N-2}, J_1, W_N(t_{N-1} | t_{N-1}, J_1, \rho), \rho), \quad t_{N-2} \leq t_{N-1} \leq t_N \quad (2.17)$$

Ове функције су конвексне у интервалу $t_{k-1} \leq t_k \leq t_{k+1}$, $k = 1, \dots, N-1$. У овом случају је и функција $W_N(t_N | t_{N-1}, J_1, \rho)$ такође конвексна за распон $t_{N-1} \leq t_N < \infty$. Могуће је пронаћи побољшани план одржавања спровођењем оптимизације за сваки период превентивног одржавања.

За задати план одржавања t_1, \dots, t_N , прорачуном се добијају одговарајуће функције релативних вредности и ρ решавањем линеарног система:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2.18)$$

где је:

$$M_{i,j} = \begin{cases} -R_i^n(t_i - t_{i-1}|t_{i-1}) & \text{ако је } i = j \text{ и } j \neq N, \\ 1 & \text{ако је } i = j + 1 \\ T_i(t_i|t_{i-1}) & \text{ако је } j = N \\ 0 & \text{у осталим случајевима} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{x} = [J_2, \dots, J_N, \rho] \quad (2.20)$$

$$\mathbf{b} = [S_1(t_1|t_0), \dots, S_N(t_N|t_{N-1})] \quad (2.21)$$

У једначини (2.19) $M_{i,j}$ означава елемент (i, j) матрице на тој позицији, а (\cdot) представља транспоновани вектор. Овај систем линеарних алгебарских једначина произлази директно из једначина оптималности (2.10) и (2.11). Уочимо да је $J_1 = 0$, пошто је овде битно наћи релативне вредности функције J_i и ρ . На крају, динамички алгоритам за одређивање оптималног плана одржавања може се представити следећим корацима:

Корак 1: Задавање почетних вредности

$$k := 0,$$

$$t_0 := 0,$$

$$\pi_N^{(0)} := \{t_1^{(0)}, \dots, t_N^{(0)}\}.$$

Корак 2: Прорачун вредности $J_1^{(k)}, \dots, J_N^{(k)}, \rho^{(k)}$ за линеаран систем (2.18) за план одржавања $\pi_N^{(k)}$.

Корак 3: Решавање следећих проблема оптимизације:

$$t_i^{(k+1)} := \arg \max_{t_{i-1}^{(k)} \leq t \leq t_{i+1}^{(k)}} W_i(t|t_{i-1}^{(k)}, t_{i+1}^{(k)}, J_1^{(k)}, J_{i+1}^{(k)}, \rho^{(k)}), \quad i = 1, \dots, N-2,$$

$$t_{N-1}^{(k+1)} := \arg \max_{t_{N-2}^{(k)} \leq t \leq t_N^{(k)}} W_{N-1}(t|t_{N-2}^{(k)}, t_N^{(k)}, J_1^{(k)}, J_1^{(k)}, \rho^{(k)}),$$

$$t_N^{(k+1)} := \arg \max_{t_{N-1}^{(k)} \leq t \leq \infty} W_N(t|t_{N-1}^{(k)}, J_1^{(k)}, J_1^{(k)}, \rho^{(k)})$$

Корак 4: За све вредности $i = 1, \dots, N$ ако је $|t_i^{(k+1)} - t_i^{(k)}| < \delta$, алгоритам се прекида, а у супротном $k := k + 1 - 2$ и повратак на Корак 2.

У Кораку 3 могу се применити произвољне методе за оптимизацију. Пошто су сложене функције конвексне и имају јединствено решење у распону $[t_{i-1}, t_{i+1}]$, $i = 1, \dots, N-1$ није тешко израчунати оптимално време превентивног одржавања. Због ефикасности проналажења решења може се користити метода златног пресека.

Дати модел има недостатке, јер код електроенергетске опреме није погодно примењивати одржавање у фиксним временским интервалима, пошто опрема ради у различитим амбијенталним условима, и под различитим оптерећењима. На неким елементима не треба спроводити одржавање дужи временски период после уградње, па овај модел није применљив.

2.2 Преглед развоја софтверских алата за анализу поузданости

Са настанком првих рачунара и програмских језика развијани су и софтвери за

анализу поузданости система. Ови софтвери су првобитно коришћени за војну индустрију, свемирска истраживања и у прорачунима код нуклеарних електрана. Тек је касније почео развој софтвера и симулација код електричне опреме.

Софтвери се могу сврстати у две категорије:

- комерцијални софтвери,
- бесплатни (*open source*) софтвери.

Комерцијални софтвери, које развијају софтверске компаније широм света, углавном се користе за детаљну анализу *EEC*-а, а обично само један модул у оквиру тих алата се користи за анализу поузданости. Код тих софтвера није дозвољена промена изворног кода нити додавање нових алгоритама. Углавном су скупи и користе се код великих *EEC*-а због праћења рада опреме.

Први софтвер који се користио за анализу поузданости је *SCOPE* (*System for Computing Operational Probability Equations*), који је развијен 1965. године у Rockwell International Corporation. *SCOPE* се користио за прецизно одређивање поузданости сложених система различитих конфигурација, али ограничене величине и базиран је на методи минималних критичних путева. Побољшану верзију *SCOPE* је развио 1972. године Burris [28] на Oklahoma State University под називом *MAPS* (*Method for Analysis of a Probabilities of System*). Овај софтвер је развијен у програмском језику *PL/I* због лакше манипулације са бинарним бројевима. Cooley је 1976. развио алат *SPARCS* који представља побољшану верзију *MAPS*, која користи комбинацију Monte Carlo симулације, Бајесове технике за прорачуне у анализама поузданости и *MTBF* сложених система. *SPARCS - 2* је ефикаснија верзија *SPARCS*-а, коју је даље развијао Lee од 1977. године.

Availability Workbench (*AWB*) софтвер развила је фирма Isograph 1988. године, а користи се у анализама поузданости и одржавања. У овом софтверском алату је интегрисан модул *AvSim+* (*Availability Simulation Software*) који се користи за прорачун расположивости у зависности од резервних делова, као и модул *RCMCost* (*Reliability Centered Maintenance*) који се користи за оптимизацију стратегија одржавања и поузданости. У софтверу *AWB* су интегрисани и модули који се односе на анализу трошкова животног циклуса система, модули са којима се анализују подаци о ранијим кваровима како би се моделовале карактеристике поузданости опреме применом *Weibull*-ове расподеле. Користећи одговарајуће модуле у овом софтверу могуће је планирати одржавање, одредити оптималну количину резервних делова, итд.

У оквиру модула *Availability Simulation* разматра се утицај кварова на рад система користећи блок дијаграме и стабла отказа. Могу се уносити подаци о кваровима као и подаци о расположивим екипама које раде у одржавању, резервним деловима, итд. Овај софтвер врши анализу система применом Monte Carlo симулације како би се добили параметри поузданости. Такође се користи за оптимизацију резервних делова који се набављају и за планирање одржавања. Подаци који се добијају на овај начин могу се представити у облику графа, као текстуални извештаји, експортују се у базу података или неку табеларну апликацију [29].

CYME је канадски софтвер за анализу *EEC*-а и има практичну примену као алат за симулацију при планирању, преносу и дистрибуцији електричне енергије. У оквиру овог софтвера је развијен посебан пакет *CYMDIST*. Са овим пакетом се обезбеђује свеобухватно моделовање и оптимизација дистрибутивне мреже, не само побољшање поузданости и сигурности, већ и смањење инвестиционих улагања [30].

ETAP је компанија која је започела развој софтвера који се користе у *EEC* - има још од 1986. године. Овај софтвер се користи у *EEC*-у за моделовање, пројектовање,

анализу, оптимизацију и предвиђање решења у реалном времену [31]. До данас преко 50000 компанија користе производе које је развила ова компанија, а користе се у производњи, преносу, дистрибуцији електричне енергије, као и у другим пројектима који се односе на индустријске енергетске системе широм света. Са овим софтвером је обухваћен велики број развијених модула који се користе за анализу кратких спојева, стартовања мотора и генератора, одређивање величине каблова, као и модул који се користи за симулације код оцене поузданости. Применом ових алата могуће је преко интернета вршити симулацију, визуелизацију и мониторинг применом напредних *web* технологија и *GIS* (географски информациони систем). Модул који се користи за симулацију поузданости назива се *Reliability Assessment Software*. Овај модул, на основу улазних података које добија при анализи система, брзо прорачунава податке за радијалне и двострано напајане системе. За сву опрему је омогућено формирање модела поузданости, прорачун показатеља поузданости и трошкова. Поред ових параметара могуће је одредити и показатеље који су значајни за потрошаче *SAIFI* (*System Average Interruption Frequency Index*), *SAIDI* (*System Average Interruption Duration Index*), *CAIDI* (*Customer Average Interruption Duration Index*), као и показатеље трошкова који су битни за произвођача као што су: *EENS* (*Expected Energy Not Served*), *ECOST* (*Expected Interruption Cost*), *IEAR* (*Interrupted Energy Assessment Rate*). Овде је могуће графички представити резултате поузданости.

PowerFactory је развила немачка фирма *DIgSILENT GmbH* и представља *Windows* оријентисан пакет за моделовање и анализу *EEC*-а. У овом алату се може једноставно интегрисати *GIS* и приказивати топологија електричне мреже. Користи се за анализу токова снага, анализу стабилности, редукацију мрежа, анализу отказа, оцену стања, одређивање поузданости, прорачун каблова и надземних водова, анализу дистрибутивне мреже итд. Софтвер је писан у *C++* скрипт језику који се назива *DPL*, са интегрисаном базом података [32].

Power Systems Simulator (PSS) је развила софтверска фирма *Siemens PTI*. У оквиру овог симулатора налазе се модули [33]:

- *Power System Simulator for Engineering (PSS/E)*
- *Siemens Network Calculator (SINCAL)*

Power System Simulator for Engineering (PSS/E) је један од првих софтвера за анализу *EEC* базиран на *GUI* који је креиран 1976. године, а који је *Siemens* откупио 2005. године и наставио даљи развој. Софтвер је развијен у *Python* програмском језику. Функције које обавља овај софтвер односе се на динамичке симулације, заштиту мреже, анализу кратких спојева, анализу стабилности итд.

Siemens Network Calculator (SINCAL) је софтверски пакет који се састоји од алата за планирање *EEC*-а, као и за друге врсте мрежа (водовод, грејање, хлађење, гасовод). Функције које се користе у анализи *EEC*-а су: анализа кратких спојева, динамичке симулације, симулација заштите, анализа поузданости и непредвиђених ситуација.

RAMP је развила фирма *Rex Thompson & Partners Ltd.* средином осамдесетих година прошлог века као програм за симулацију расположивости, који се користио за моделовање процеса и постројења. Првобитна верзија је радила под *DOS* оперативним системом, да би фирма *Atkins* након преузимања даљи развој апликација усмерила на *Microsoft Windows* платформу и *Visual Basic*. Данас се овај софтвер користи у транспорту, производним процесима, војној индустрији и *EEC* - има [34].

Бесплатни софтвери за симулацију поузданости развијају се на универзитетима у оквиру пројеката који се раде за потребе анализа поузданости *EEC*-а или за

едукативне сврхе. Деведесетих година прошлог века са развојем програмских језика, развијани су и симулатори за анализу поузданости. Научници Goel и Gupta у раду [35] су дали приказ развоја симулатора за анализу поузданости користећи Monte Carlo симулацију. Софтвер је био једноставан за употребу и вршио је прорачуне показатеља поузданости у задатом симулираном времену. Примењиван је као алат за прорачуне у *ЕЕС*-у и као образовни софтвер. Софтвер је тестиран и добијени резултати су упоређивани са резултатима добијеним аналитичким методама и одступања су била минимална [36].

У оквиру последипломских студија на *KTH Royal Institute of Technology* у Стокхолму, Шведска, развијен је софтвер *RACalc* за анализу поузданости дистрибутивних система. Користи се у процесу планирања одржавања и анализе ризика. Применом овог софтвера у неким деловима дистрибутивног система Шведске, интезитет кварова се смањио од 10% до 21% код неких значајнијих компоненти, док се укупна поузданост система побољшала за 7% [37]. Са овим софтвером се утврђује зависност између показатеља поузданости *SAIFI*, *SAIDI*, *CAIDI*, *ASAI*, итд.

За динамичко моделовање и симулацију система користе се различити софтвери који имају бесплатне и комерцијалне верзије. Бесплатне верзије су намењене су за образовне сврхе и у зависности од симулационих метода које се примењују зависиће избор софтвера. Најчешће коришћени софтвери су: *Arena*, *AnyLogic*, *Open Modelica*, *iThink/STELLA*, *Vensim*, итд.

У дисертацији ће се користити софтверски алат *VenSim PLE (Personal Learning Edition)* верзија 6.3 [38]. Погодан је за визуелно моделовање, креирање документације, анализу, симулацију и оптимизацију модела динамичких система [39]. Применом овог софтвера се формира динамички модел за симулацију користећи дијаграм узрочне петље и дијаграм тока. Овај софтвер омогућава моделовање и симулацију понашања система.

3. МЕТОДЕ АНАЛИЗЕ ПОУЗДАНОСТИ

3.1 Увод

Технички системи су изложени кваровима различитог обима и неповољним временским приликама, што може довести до прекида у испоруци електричне енергије потрошачима. У појединим случајевима, временске прилике могу довести до поремећаја рада система и када је опрема оклопљена или у затвореном простору. Поменути догађаји су случајни и не могу се контролисати. Они се морају детаљно разматрати како би се минимизирали негативни ефекти на систем, првенствено у погледу броја и трајања прекида напајања потрошача.

Побољшање квалитета снабдевања потрошача, ради снижавања броја и трајања прекида напајања, захтева од испоручилаца да уложи знатна финансијска средства, која су често ограничена. Оправданост сваке инвестиције се проверава упоредном анализом потребних трошкова са очекиваним уштедама.

Број и трајање прекида напајања су кључни елементи поузданости испоруке електричне енергије. Поузданост се мери преко више различитих показатеља, као што су расположивост, интензитет и учестаност отказа, неотказивост и др [40]. Један систем се сматра поузданим ако његови карактеристични показатељи у обављању одређене функције имају вредности које нису лошије од захтеваних. Из претходног следи да се ниво поузданости оцењује на основу потреба корисника функција које систем обавља, што значи да са гледишта неких корисника систем може бити поуздан, а других, који имају веће захтеве, непоуздан. Један систем може бити поуздан у обављању једних, а непоуздан у обављању других функција. Системи без могућности отказа не постоје [40].

Прорачуни поузданости се заснивају на моделима елемената и система који одражавају њихове карактеристике и структуру и на подацима о показатељима поузданости елемената исте или сличне врсте, до којих се долази статистичком обрадом података из експлоатације.

Показатељи поузданости се, генерално посматрано, могу поделити на статичке и динамичке. Статички се дефинишу за обновљиве елементе и системе. Они указују на просечно понашање у дугом периоду експлоатације, често у току целог техничког века елемента или система. Динамички показатељи се одређују за необновљиве објекте али и за обновљиве објекте када је потребно предвиђање њиховог понашања у ограниченом временском периоду.

Стационарне вредности показатеља омогућавају процене техничко - економских карактеристика постројења у вишегодишњој експлоатацији и избор најповољнијих решења. Динамички показатељи омогућавају утврђивање тренутка када је оправдано применити неко од решења. Динамички модели елемената се најчешће представљају експоненцијалном и *Weibull*-овом расподелом.

У анализама поузданости, један технички систем се може представити у облику мрежног модела у коме су елементи повезани редно, паралелно или њиховом комбинацијом.

Да би систем имао што већу поузданост у обављању предвиђене функције, неопходно је спроводити различите облике превентивног одржавања појединих типова опреме. Која врста превентивног одржавања ће се спроводити зависи од важности објекта, његове старости и експлоатационих услова. Превентивно одржавање се може

изводити у фиксним временским интервалима, на основу захтеване поузданости или на основу стања посматраног система. Спровођењем превентивног одржавања врши се превенција кварова и продужава животни век опреме, дакле, утиче се на побољшање показатеља поузданости одржаване опреме.

3.2 Карактеристичне функције у анализама поузданости

У анализама поузданости системи се могу поделити на обновљиве и необновљиве.

Када настане квар на необновљивим системима, систем се повлачи из употребе. Животни век таквих система траје до тренутка настанка квара.

Код обновљивих система је већа вероватноћа да ће систем бити исправан у неком тренутку t .

Динамички показатељ који одређује вероватноћу да ће систем до посматраног тренутка бити исправан назива се неотказивост (поузданост).

Функција неотказивости се дефинише на следећи начин:

$$R(t) = P(T > t), \text{ за } t > 0, \quad (3.1)$$

где су:

T - време трајања исправног рада система;

t - време од тренутка почетка рада система до тренутка посматрања.

Овај израз представља вероватноћу да неће доћи до настанка квара у интервалу $(0, t]$.

Функција отказивости (непоузданости) представља вероватноћу да ће у тренутку посматрања t доћи до квара опреме.

Дефиниција отказивости је:

$$Q(t) = P(T \leq t), \text{ за } t > 0. \quad (3.2)$$

Отказивост је такође динамички показатељ, па постоји зависност између једначина (3.1) и (3.2):

$$R(t) + Q(t) = 1. \quad (3.3)$$

Густина расподеле вероватноће случајно променљиве T се представља у као [3]:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

Пошто је

$$dQ(t) = Q(t + dt) - Q(t) = P\{t < T \leq t + dt\}, \quad (3.5)$$

из (3.4) и (3.5) произлази да $f(t)dt$ представља вероватноћу да ће систем отказати у временском интервалу $(t, t + dt)$.

Диференцирањем једначине (3.3) по времену и заменом у једначини (3.4) добија се:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}. \quad (3.6)$$

Функција $Q(t)$ се може одредити из $f(t)$:

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx = \int_0^t f(x)dx. \quad (3.7)$$

Пошто случајна променљива време нема негативне вредности, доња граница другог интеграла у једначини (3.7) полази од 0.

На основу једначина (3.3) и (3.7) добија се:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx = \int_0^{\infty} f(x)dx - \int_0^t f(x)dx = \int_t^{\infty} f(x)dx. \quad (3.8)$$

Интензитет отказа у анализи поузданости се дефинише у облику:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{(t < T \leq t + \Delta t)(T > t)\}}{\Delta t}. \quad (3.9)$$

Израз у бројиоцу у једначини (3.9) представља вероватноћу да ће систем отказати у интервалу $(t, t + \Delta t)$, ако није отказао до тренутка t .

Општа релација за вероватноћу коинциденције два догађаја, на пример A и B је:

$$P\{A \cdot B\} = P\{A|B\} \cdot P\{B\} \Rightarrow P\{A|B\} = \frac{P\{A \cdot B\}}{P\{B\}}. \quad (3.10)$$

Условна вероватноћа из једначине (3.8), једнака је:

$$P\{(t < T \leq t + \Delta t)(T > t)\} = \frac{P\{(t < T \leq t + \Delta t) \cdot (T > t)\}}{P\{(T > t)\}} = \frac{P\{t < T \leq t + \Delta t\}}{R(t)}. \quad (3.11)$$

Коначни облик релације (3.11) је једноставан јер је догађај B садржан у догађају A , због чега се вероватноћа коинциденције два догађаја поклапа са вероватноћом догађаја A . Из претходних једначина добија се:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.12)$$

Заменом једначине (3.12) у (3.6) добија се диференцијална једначина чијом интеграцијом се добија израз за $R(t)$:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right). \quad (3.13)$$

Из претходних једначина се може утврдити зависност између параметара $R(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$. Довољно је познавати један од показатеља да би се одредили остали.

За практичне процене поузданости даје се средње време трајања исправног рада, које се одређује као математичко очекивање времена трајања исправног рада система:

$$m \equiv E\{T\} \equiv \int_0^{\infty} tf(t)dt = -\int_0^{\infty} tR'(t)dt. \quad (3.14)$$

И у једначини (3.14) доња граница полази од 0 пошто случајна променљива време нема негативне вредности. Парцијалном интеграцијом другог интеграла из једначине (3.14) добија се:

$$m = -tR(t)\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt. \quad (3.15)$$

У једначини (3.15) први члан је једнак нули, јер поузданост $R(t)$ брже тежи нули ако је вредност t велика. Параметар m је статички, јер не зависи од времена.

Сви наведени параметри се користе код обновљивих система, да би се оценила поузданост система од тренутка пуштања система у рад до првог отказа. Овде се мисли о сваком пуштању опреме у рад, односно при обнављању опреме. Претпоставља се да се обнављањем систем доводи у стање као да је нов. Под отказом се мисли на први отказ који ће уследити после сваког пуштања система у рад (првог, или после обнављања). Параметар m се често у англо-америчкој литератури означава са *MTTF* (*Mean Time To Failure*). Да би се добили подаци о понашању система користе се претходно наведени параметри.

Вероватноћа да ће систем отказати у временском интервалу (t_1, t_2) може се израчунати на следећи начин:

$$P\{t_1 < T \leq t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(x)dx = Q(t_2) - Q(t_1) = R(t_2) - R(t_1). \quad (3.16)$$

На основу једначине (3.16), вероватноћа да ће систем бити исправан у временском интервалу (t_1, t_2) је:

$$1 - P\{t_1 < T \leq t_2\} = 1 - R(t_1) + R(t_2) = Q(t_1) + R(t_2). \quad (3.17)$$

Према једначинама (3.10) и (3.16), вероватноћа да ће систем отказати у временском интервалу (t_1, t_2) , ако није отказао до тренутка t_1 је:

$$P\{(T \leq t_2)|(T > t_1)\} = \frac{P\{t_1 < T \leq t_2\}}{P\{T > t_1\}} = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{R(t_1)}. \quad (3.18)$$

Условна вероватноћа настанка отказа из једначине (3.18) је већа од вероватноће отказа према (3.16) ако је $t_1 > 0$, јер је тада $R(t_1) < 1$.

Из једначине (3.18) може се израчунати вероватноћа исправног рада система у току временског интервала (t_1, t_2) ако је систем био исправан до тренутка t_1 :

$$P\{(T > t_2)|(T > t_1)\} = 1 - P\{(T \leq t_2)|(T > t_1)\} = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}. \quad (3.19)$$

Разматрана вероватноћа се може израчунати и помоћу интензитета отказа, заменом релације (3.13) у (3.19):

$$P\{(T > t_2)|(T > t_1)\} = \exp\left(-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(x)dx\right). \quad (3.20)$$

3.3 Одређивање показатеља поузданости из података у току експлоатације

Показатељи поузданости система одређују се обрадом података из рада великог броја система исте врсте. Системи који се анализују треба да раде у приближно једнаким условима. Системи се посматрају од пуштања у рад, па све до настанка квара.

Нека је $n(t)$ број система који су отказали до тренутка t , а $N(t)$ број система који су радили исправно до тренутка t . Са $\Delta n(t_{12})$ означава се број система који су отказали у временском интервалу $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$.

Неотказивост система у неком тренутку t_1 одређује се као вероватноћа да систем неће отказати до посматраног тренутка и израчунава се из посматраних података као:

$$R(t_1) = \frac{N(t_1)}{N(0)}. \quad (3.21)$$

На основу израза (3.4), одређује се густина расподеле вероватноће трајања исправног рада у временском интервалу Δt_{12} :

$$f(\Delta t_{12}) = \frac{\Delta n(t_{12})}{N(0) \cdot \Delta t_{12}}. \quad (3.22)$$

Интензитет отказа у временском интервалу Δt_{12} , на основу израза (3.12), израчунава се као:

$$\lambda(\Delta t_{12}) = \frac{\Delta n(t_{12})}{N(t_1) \cdot \Delta t_{12}}. \quad (3.23)$$

Ако се посматра већи број система $N(0)$ биће тачнији прорачун показатеља поузданости преко наведених израза. Такође, треба водити рачуна да, при избору временских интервала Δt_{12} , број отказалих система не буде премали. Временски интервали посматрања се обично деле на K интервала једнаке дужине Δt . Број интервала K треба изабрати тако да се сачува временска промена показатеља која је садржана у подацима посматрања и избегну велика усредњавања података. Оптималан број K се добија из емпиријске релације:

$$K = 1 + 3,3 \cdot \log n, \quad (3.24)$$

где је: n - укупан број забележених отказа.

Алтернативна емпиријска формула за K је:

$$K = \sqrt{n}. \quad (3.25)$$

Анализом стања елемената може се одредити и средње време исправног рада дефинисано изразом (3.15):

$$m = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} T_i, \quad (3.26)$$

где је: T_i - време трајања исправног рада елемента i .

Да би се одредили показатељи поузданости система могу се користити сви наведени изрази на основу посматрања само једног система. Систем ће више пута отказати у довољно дугом временском периоду. Ако се обнављањем систем доводи у стање као да је нов, сви периоди рада система се могу сматрати независним узорцима рада система. Ти подаци се могу обрађивати на исти начин као што су претходним разматрањима као узорци обрађивани подаци о раду различитих система. Подаци за поједине периоде рада не би били независни, ако би систем имао различите

карактеристике у зависности од тога колико дуго је радио и колико пута је био обнављан до посматраног периода рада.

3.4 Расподеле вероватноћа у анализама поузданости

При анализи различитих показатеља поузданости система најподесније је представити их неким математичким функцијама. Овде ће бити приказане неке од најзначајнијих теоријских расподела којима се могу апроксимирати расподеле вероватноћа боравка различитих уређаја у појединим карактеристичним стањима.

Постоје два основна типа расподела: континуалне и дискретне.

Континуалне расподеле представљају случајне вредности у облику реалног броја, док дискретне расподеле представљају случајне променљиве као дискретне вредности који су позитивне и целобројне. Две најзначајније дискретне расподеле су биномна и Поисонова расподела. Најчешће коришћене континуалне расподеле су нормална, експоненцијална, *Weibull*-ова, гама и Релејева расподела [38, 39]. Овде ће бити описане експоненцијална и *Weibull*-ова расподела које ће се користити у развоју динамичког модела. Експоненцијална расподела се користи у периоду стабилне експлоатације система, док се *Weibull*-ова расподела користи због њеног параметарског карактера, јер се при избору одговарајућих вредности параметара дефинишу различити закони случајно променљивих величина [41].

Расподела вероватноћа случајне променљиве X је:

$$F(X) \equiv P\{X \leq x\}, \quad (3.27)$$

где је: x - могућа вредност X .

Густина расподеле вероватноћа X :

$$f(x) \equiv F'(x). \quad (3.28)$$

Математичко очекивање X :

$$M \equiv E(x) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \Rightarrow M = \int_0^{\infty} xf(x)dx. \quad (3.29)$$

У случају да је X време, доња граница интеграла код једначине (3.29), полази од 0, пошто се за време узимају само позитивне вредности.

3.4.1 Експоненцијална расподела

Експоненцијална расподела је једна од најзначајнијих расподела у анализи поузданости. Интензитет отказа λ код ове расподеле је константна вредност. Време до настанка квара је независно од времена рада посматране опреме. Експоненцијална расподела се може представити следећом релацијом:

$$F(X) = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda \cdot x), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

На основу израза (3.28) и (3.30) добија се:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

На основу претходно наведених општих дефиниција, у изразима за експоненцијалну расподелу се добија:

$$M = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.32)$$

Експоненцијална расподела омогућава једноставно моделовање времена боравка система у карактеристичним стањима. Према изразима (3.13) и (3.18), вероватноћа да ће систем који је радио до тренутка t_1 отказати у временском периоду $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$, за експоненцијалну расподелу времена исправног рада је:

$$P\{(T \leq t_2) | (T > t_1)\} = 1 - \exp\left(-\int_{t_1}^{t_2} \lambda dt\right) = 1 - \exp(-\lambda \cdot (t_2 - t_1)). \quad (3.33)$$

3.4.2 Weibull-ова расподела

Weibull-ову расподелу карактеришу три параметра:

α - параметар размере,

β - параметар облика,

ν - позициони параметар.

Weibull-ова расподела вероватноћа и густина расподеле, описују се следећим релацијама [42]:

$$F(X) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \nu}{\alpha}\right)^\beta\right], & x \geq \nu \\ 0, & x < \nu \end{cases} \quad (3.34)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x - \nu}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x - \nu}{\alpha}\right)^\beta\right], & x \geq \nu \\ 0, & x < \nu \end{cases} \quad (3.35)$$

Карактеристични параметри расподеле на основу израза (3.28) и (3.29) су [6]:

$$M = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + \nu, \quad (3.36)$$

где је са $\Gamma(x)$ означена гама функција која је дефинисана изразом:

$$\Gamma(x) \equiv \int_0^{\infty} y^{x-1} \cdot \exp(-y) dy, \quad x > 0. \quad (3.37)$$

Парцијалном интеграцијом се из (3.37) добија функционална зависност:

$$\Gamma(x) = (x-1) \cdot \Gamma(x-1). \quad (3.38)$$

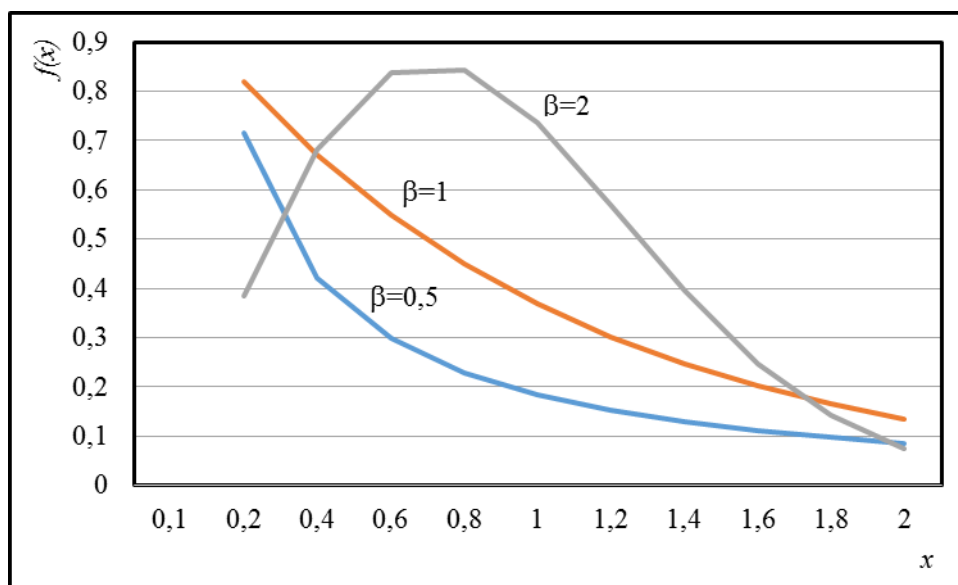
Ако је x природан број, онда се $\Gamma(x)$ своди на:

$$\Gamma(x) = (x-1)! \quad (3.39)$$

Из израза (3.36) утврђује се да параметар ν линеарно мења вредност математичког очекивања. Интензитет отказа се добија из израза (3.11), (3.34) и (3.35):

$$\lambda(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x - \nu}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (3.40)$$

Ако је $\beta > 1$, интензитет отказа код *Weibull*-ова расподеле расте са x . Ако се узме да је случајна променљива X време, овом расподелом се може узети у обзир старење система. Ако је $\beta = 1$ и $\nu = 0$, *Weibull* - ова расподела прелази у експоненцијалну. На слици 3.1 [43, 44] приказана је функција $f(x)$ за $\nu = 0$ и $\alpha = 1$, за неколико вредности параметра β . Из дијаграма се може закључити да параметар облика значајно утиче на облик кривих код ове расподеле.



Слика 3.1 Густина *Weibull*-ове расподеле вероватноћа за $\nu = 0$ и $\alpha = 1$ [43, 44]

3.4.3 Мешавина расподела

Због настанка случајних кварова, или кварова који су последица похабаности или старења, елементи *ЕЕС* могу прећи из радног у нерадно стање. У таквим случајевима се вероватноћа боравка у исправном стању може представити мешавином експоненцијалне и *Weibull*-ова расподеле [1]:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (3.41)$$

Интензитет отказа је:

$$\lambda(t) = \lambda + \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.42)$$

3.5 Модел мрежних структура

Мрежним моделом се представља прекид функције као прекид везе између два карактеристична чвора, при чему се један назива улазни, а други излазни. Компоненте

система се представљају у облику грана мреже, па се неисправно стање неке компоненте у мрежи представља као прекид те гране. У анализама поузданости користе се само графови мрежа који у потпуности описују структуру система. Функционални граф описује начин рада система у погледу поузданости, али не мора да има сличности са физичком структуром система.

Правило за конструисање графа је једноставно. Граф приказује неисправна стања система. Гране компонентата су у паралелној вези ако је систем неисправан када су све одговарајуће компоненте неисправне. Редном везом се повезују све ситуације у којима је систем неисправан.

Паралелна веза моделује неисправно стање система које се гради из неисправних стања компоненти свезом „I“, а редна веза свезом „II“.

У већини случајева функционални графови се састоје од редне или паралелне везе грана или од њихових комбинација, при чему су гране међусобно независне у погледу поузданости.

За просте мрежне облике једноставно се изводе општи аналитички изрази показатеља поузданости.

3.5.1 Редна веза

Ако се функционални граф састоји од n редно везаних грана, систем је исправан ако су му исправне све компоненте. Поузданост таквог система се исказује изразом [3]:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (3.43)$$

У изразу (3.43) са $R_i(t), i = 1, 2, \dots, n$, је означена неотказивост елемента i . Отказивост система се одређује из релације (3.3):

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)). \quad (3.44)$$

За мале вредности $U_i(t), i = 1, 2, \dots, n$, израз (3.44) се може написати у облику:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q_i(t). \quad (3.45)$$

Интензитет отказа за редну везу се добија као збир интензитета отказа свих елемената:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (3.46)$$

3.5.2 Паралелна веза

Код система чији се функционални граф састоји од n паралелно везаних елемената јављају се прелази у неисправно стање само ако су све компоненте неисправне. Отказивост система се одређује изразом:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t), \quad (3.47)$$

а неотказивост (поузданост):

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t). \quad (3.48)$$

Изрази (3.47) и (3.48) се једноставно преводе у одговарајуће изразе за нерасположивост и расположивост система за стационарне вредности показатеља поузданости:

$$U = \prod_{i=1}^n U_i, \quad (3.49)$$

$$A = 1 - \prod_{i=1}^n U_i, \quad (3.50)$$

где је:

U - нерасположивост система,

U_i - нерасположивост i - тог елемента,

A - расположивост система,

A_i - расположивост i - тог елемента.

Обнављањем било које компоненте система, из неисправног стања систем се преводи у исправно. Интензитет напуштања овог стања (интензитет обнављања система) је једнак:

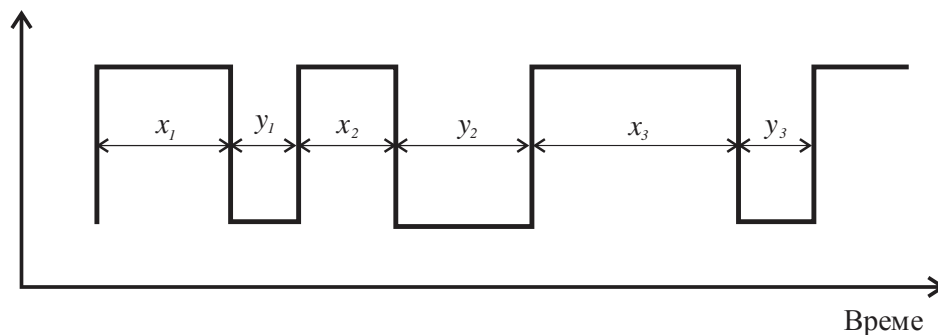
$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i. \quad (3.51)$$

3.6 Аналитичке методе за анализу поузданости

Најчешће аналитичке методе које се користе за одређивање поузданости су [75]:

1. метода простора стања,
2. метода селективног претраживања,
3. метода минималних пресека.

Метода простора стања се примењује при моделовању елемената коју могу бити у два основна стања: у раду, или у стању обнављања. Ако је случајна величина X време трајања рада, а случајна величина Y време трајања обнављања, онда се трајање исправног рада и обнављања могу означити са x_k и y_k , $k=1, \dots, n$. Понашање система се може приказати помоћу временског дијаграма стања (слика 3.2).



Слика 3.2 Временски дијаграм стања

Средње време трајања исправног рада - $MTTF$ се може дефинисати као:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \text{ - за континуалну расподелу,} \quad (3.52)$$

$$MTTF = \sum_{x=0}^{\infty} x \cdot P_x \text{ - за дискретну расподелу.} \quad (3.53)$$

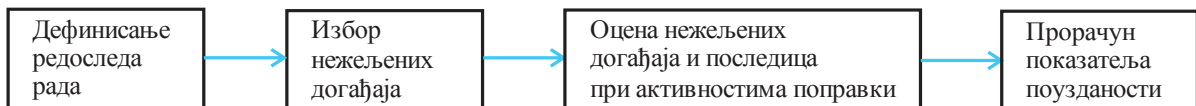
Заменом једначине (3.6) у (3.52) добија се:

$$MTTF = \int_0^{\infty} -\frac{dR(t)}{dt} t dt = -t \cdot R(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \cdot \quad (3.54)$$

За експоненцијалну расподелу $MTTF$ се одређује као:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \cdot \quad (3.55)$$

Метода са селективним претраживањем код техничких система се може приказати у четири корака која су дата на слици 3.3.

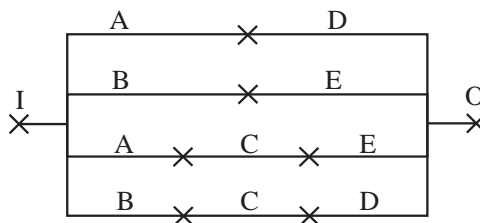


Слика 3.3 Корази код методе селективног претраживања

Метода минималних пресека се користи у анализи поузданости система који се описују помоћу функционалних графова. Пресек графа представља скуп изостављених грана графа који прекида везу између улазних и излазног чвора. Минимални пресек представља пресек који не садржи друге поновљене пресеке. Ред пресека представља број грана које пресек садржи. Највиши могући ред пресека се добија као разлика броја грана и броја чворова графа увећан за 2. Паралелне гране се рачунају као једна грана. Два пресека су зависна уколико садрже бар једну исту грану [3].

Граф са минималним путевима може користити матрицу минималних путева димензије $m \times n$ (где је: m - број минималних путева, а n - број грана графа). Елемент E_{ij} има вредност 1 ако грана j припада минималном путу i , а нула у осталим случајевима. За илустрацију матрице минималних путева узећемо пример графа са слике 3.4. Ако се гране ређају по редоследу А, В, С, D, Е, добија се матрица:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \quad (3.56)$$



Слика 3.4 Пример графа [3]

Колоне матрице \mathbf{P} показују у којим се све минималним путевима налазе одговарајуће гране графа. Ако је колона за неку грану попуњена са свим јединицама та грана се налази у свим минималним путевима. Из тога произлази да се прекидом посматране гране прекидају сви минимални путеви, па самим тим и веза између улазног и излазног чвора. Према томе, посматрана грана представља минимални пресек првог реда. Пресеци вишег реда се налазе сабирањем колона матрице \mathbf{P} применом правила Булове алгебре:

$$\begin{aligned} 1+1 &= 1 \\ 1+0 &= 1 \\ 0+1 &= 1 \\ 0+0 &= 0 \end{aligned} \tag{3.57}$$

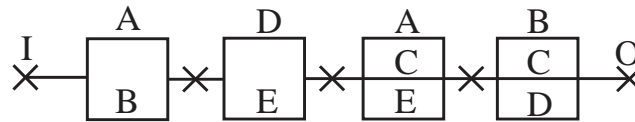
Сабирањем колона матрице \mathbf{P} које одговарају одређеним гранама добија се вектор - колона који показује у којим се минималним путевима налази бар нека од посматраних грана. Ако су сви елементи добијеног вектора - колоне јединице, посматране гране чине пресек графа, пошто се њиховим једновременим прекидом прекидају сви минимални путеви. Овај поступак се изводи по одређеном редоследу, како би се утврдили само минимални пресеци. Ток поступка је следећи:

1. Прегледом матрице \mathbf{P} утврђују се колоне испуњене само јединицама и тако идентификују гране које су пресеци првог реда. Те колоне се искључују из даљег претраживања изостављањем из матрице \mathbf{P} . Тако се формира сажета матрица минималних пресека \mathbf{P}' .
2. Прва колона \mathbf{P}' се додаје редом осталим колонама \mathbf{P}' да би се одредили минимални пресеци другог реда које гради прва грана. Исти поступак се понавља са колонама за другу, трећу, ..., грану графа, при чему се колоне додају гранама које их следе по редоследу. Тако се налазе сви минимални пресеци другог реда.
3. Парови колона матрице \mathbf{P}' додају се осталим колонама које их следе да би се утврдили пресеци трећег реда. Из наведених пресека се као минимални издвајају они који не садрже пресеке другог реда нађене у другом кораку.
4. Тројке колона матрице \mathbf{P}' додају се колонама које следе да би се одредили пресеци четвртог реда. Из пронађених пресека се као минимални издвајају пресеци који не садрже претходно пронађене минималне пресеке нижег реда.
5. Описани поступак се наставља све до пресека реда q . Поступак се у практичним прорачунима често прекида и раније пошто су вероватноће да ће се имати пресеци високог реда врло мале. Код прорачуна поузданости електроенергетских мрежа и постројења се углавном не узимају у обзир пресеци вишег реда од трећег.

Применом описаног поступка за граф са слике 3.4 на основу матрице (3.56) добијају се следећи минимални пресеци:

$$AB \ DE \ ACE \ BCD \tag{3.58}$$

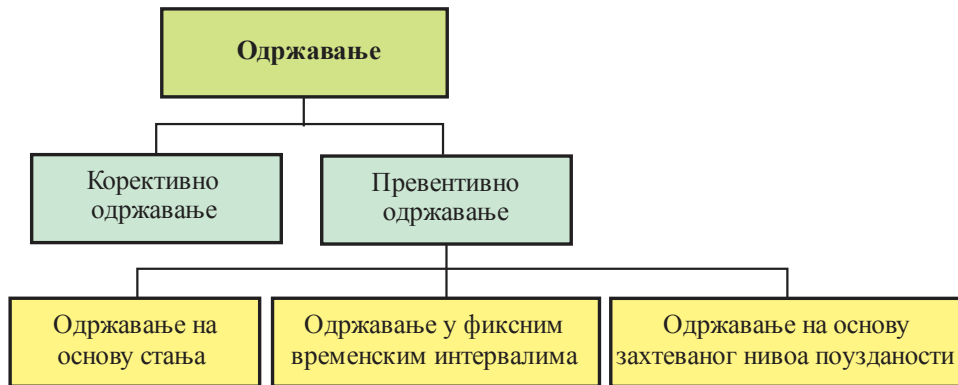
Веза између улазног и излазног чвора функционалног графа прекида се када су у прекиду једновремено све гране садржане у пресеку. Поменута веза се губи када је у прекиду бар један минимални пресек. Функционалном графу са слике 3.4 је еквивалентан граф са минималним пресецима који се састоји из редне везе паралелно везаних грана које чине минималне пресеке (слика 3.5).



Слика 3.5 Еквивалентан граф са минималним пресецима

3.7 Стратегије одржавања система

Одржавање представља скуп техничких, административних и управљачких акција током животног циклуса опреме чији је основни циљ да опрему задржи у радном стању. У случају погоршања стања опреме спроводе се одређене активности на опреми како би могла обављати дефинисану функцију. У зависности од врсте опреме, примењују се две стратегије одржавања: корективно и превентивно (слика 3.6) [45].



Слика 3.6 Хијерархијска структура стратегија одржавања [45]

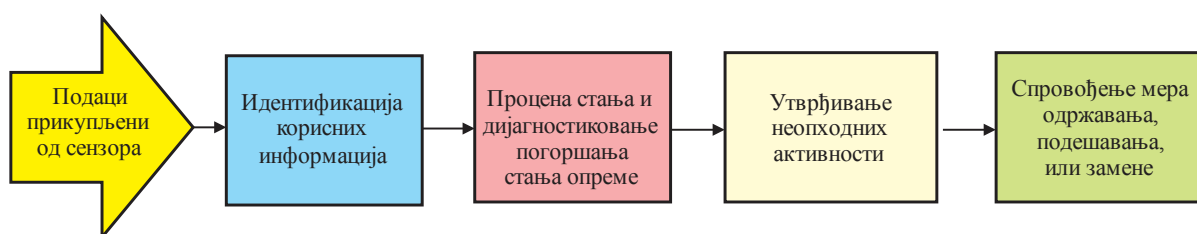
1. Корективно одржавање-овај вид одржавања је дуго времена био једини који је примењиван. Опрема се поправља или мења оног тренутка када дође до настанка квара. Обично се примењује код елемената чији кварови имају мали утицај на процес рада или код опреме код које се кварови ретко дешавају. На тој опреми се не врши сервисирање, нити се изводе плански прегледи и тестирање како би се одредило тренутно стање опреме. Када дође до квара на опреми, ти кварови се поправљају или се опрема замењује новом. За делове опреме који нису од важности за рад система, ово је најјефтинији вид одржавања, јер није потребно ангажовати људе да врше прегледе и тестирање такве опреме. Међутим, овај вид одржавања код опреме чији кварови могу изазвати последице по животну средину или узроковати велике финансијске губитке, данас се не примењује.

2. Превентивно одржавање-овај начин одржавања се обавља прегледом опреме, различитим активностима које се прописују у одређеним временским интервалима, како би се минимизирала деградација опреме. Обично се временски интервали одржавања одређују на основу документације коју прописује произвођач опреме или на основу ранијег искуства у раду опреме. План одржавања се спроводи за најнеповољније случајеве стања опреме. Основни циљ је спречавање настанка квара или проблема и обезбеђење максималне поузданости. Међутим, трошкови одржавања су у овим случајевима већи, јер се дешава да се замени опрема која би могла да ради дужи временски период од предвиђеног. Овај вид одржавања се и данас примењује код

великог броја система. Превентивно одржавање се може спроводити на основу стања, у фиксним временским интервалима и на основу захтеваног нивоа поузданости.

Одржавање на основу стања (Condition Based Maintenance - CBM) - Код ове врсте одржавања се користе различите дијагностичке методе. Мониторинг стања опреме може бити непрекидан, планиран или на захтев, у зависности од врсте опреме.

Блок дијаграм на слици 3.7 приказује *CBM* систем који се интегрише са системом мониторинга и процене стања система. Сензори који су постављени да дијагностикују стање опреме користе се за прикупљање података као што су подаци о температури, вибрацијама, присуству гасова у уљу и др. Када су подаци добијени од сензора идентификовани и нормализовани, прелази се на фазу прикупљања података, а потом се идентификују корисне информације. Следећа фаза је процена стања и дијагностиковање погоршања стања опреме, а након тога следи излазна фаза, где се одређује врста погоршања и неопходне акције користећи неке од метода вештачке интелигенције или других логистичких метода. У последњој фази се спроводи одржавање, подешавање или замена опреме која се анализује.



Слика 3.7 Блок дијаграм система одржавање према стању

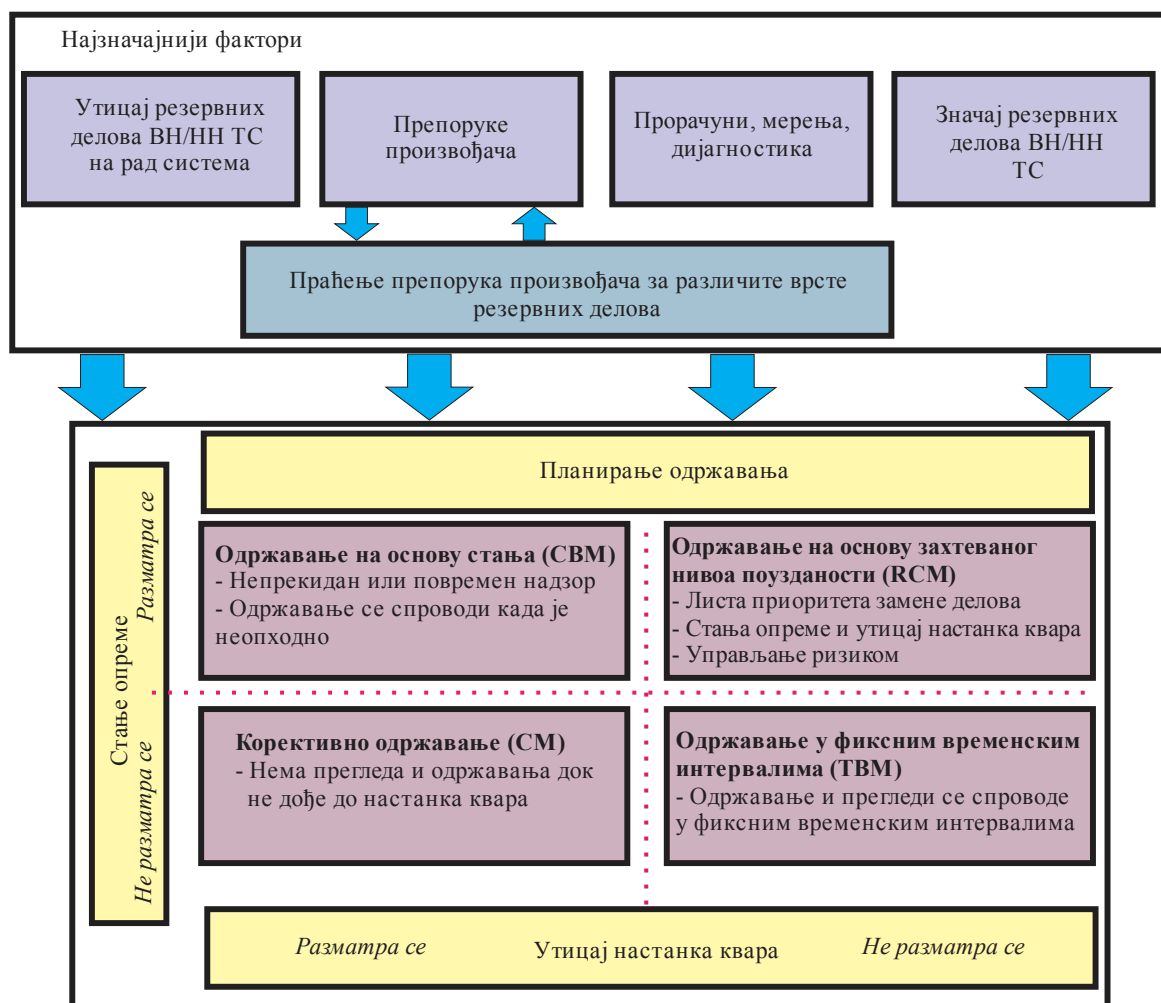
Одржавање у фиксним временским интервалима (Time Based Maintenance - TBM)-ово одржавање се спроводи прегледима, испитивањем и заменом опреме у константним временским интервалима. Време одржавања прописује произвођач опреме или га одређује оператор на основу претходног искуства са истом или сличном опремом. Ако је време између одржавања кратко, овај вид одржавања ће утицати на повећање трошкова одржавања и губитке времена за замену опреме која је у релативно добром стању и могла би да ради дуже од предвиђеног времена. Ако је време које се планира између одржавања дуже, могу настати непланирани кварови.

Одржавање на основу захтеваног нивоа поузданости (Reliability Centered Maintenance - RCM) - Представља систематски програм одржавања који се заснива на утицају настанка кварова опреме на целокупан рад система. Применом овог одржавања, задржава се одређени ниво поузданости система и оптимизују трошкови одржавања.

Према истраживањима, применом *RCM* одржавања укупни трошкови одржавања могу да се смање за 30 - 40% спровођењем следећих активности:

- издвајањем критичних елемената система и њихових функција у систему,
- анализом начина и утицаја настанка квара сваког појединачног елемента,
- утврђивањем историје настанка кварова и прорачуном средњег времена између кварова,
- одређивањем врсте квара и одређених активности одржавања,
- спровођењем одржавања,
- оценом програма одржавања који укључује и анализу трошкова.

Која стратегија одржавања ће се спроводити зависи од различитих фактора који се разматрају. На слици 3.8 је приказан модел стратегије одржавања којим се утврђује које одржавање је најпогодније применити при утицају различитих фактора.

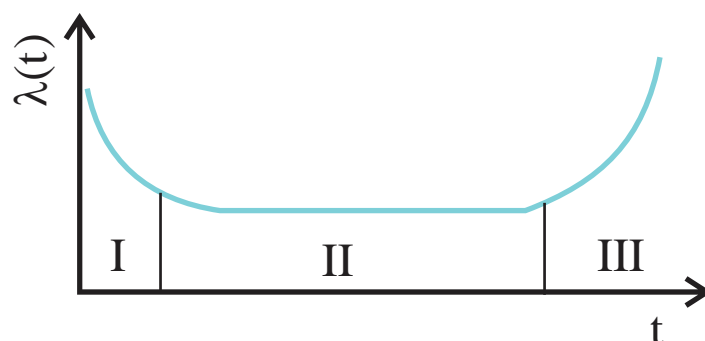


Слика 3.8 Стратегије одржавања [46]

Да би се извршила оптимизација активности одржавања, неопходно је добро познавање значаја опреме која се одржава. Основни циљ је повећање поузданости и смањење ризика настанка кварова на опреми, а то се постиже прегледима.

Кварови могу настати изненада или постепено, током дужег временског периода. Какви ће кварови настати, зависи од физичких карактеристика, хемијских механизма и од врсте опреме.

Код електричне опреме кварови су ретки и изненадни, а најчешће су последица спољашњих узрока. Интензитет кварова техничких система, у општем случају се може представити као на слици 3.9.



Слика 3.9 Промена интензитета отказа у току животног века [1]

На дијаграму се разликују три временска периода. Интензитет кварова је релативно висок у (I) периоду у току кога долазе до изражаја скривене конструктивне грешке, оштећења у транспорту, грешке у монтажи и друго. Отклањањем наведених недостатака, смањује се интензитет отказа на приближно константан ниво (II) у току дугог временског периода. Услед старења опреме и дуже експлоатације долази до непрекидног пораста интензитета отказа (на слици је приказан као (III) период). Технички век опреме је завршен када настане квар који се не може отклонити поправком или када трошкови одржавања расту до вредности које су блиске цени нове опреме, па је замена опреме економски оправданија.

4. ДИНАМИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ ЕФЕКТА ПРЕВЕНТИВНИХ АКТИВНОСТИ

4.1. Увод

Анализа поузданости сложених система обухвата више елемената као што су хардвер, софтвер, организација и људски ресурси. Ови елементи значајно утичу на стратегију одржавања. Потребно је правити разлику између појмова модел и моделовање. Модел представља опис система применом математичких функција које су карактеристичне за посматрани систем. Моделовање је процес формирања претпоставки о реалном систему, тестирање идеја, објашњење појава, итд. на основу модела. С настанком рачунара и развојем софтвера, повећана је могућност формирања сложених модела.

Основни циљ динамичког моделовања код електричне опреме је одређивање превентивних активности које ће у правом тренутку бити спроведене. Формирањем динамичког модела спроводе се активности које врше оператори. На основу модела утврдиће се прецизни тренуци замене критичних елемената [48, 49].

Динамичко моделовања ефеката превентивних активности електричне опреме се заснива на: анализи стања, различитим стратегијама одржавања, утврђивању оптималног тренутка замене елемената, тренутка набавке резервног елемента, као и минимизацији трошкова који настају при спровођењу превентивних активности одржавања. Понашање опреме је од пресудног значаја за спровођење превентивних активности одржавања. При динамичком моделовању поузданости електричне опреме неопходно је формирати план по коме ће се на основу догађаја и промена на систему, праћењем стања одређених елемената, утврдити колика је вероватноћа настанака неког квара на том елементу.

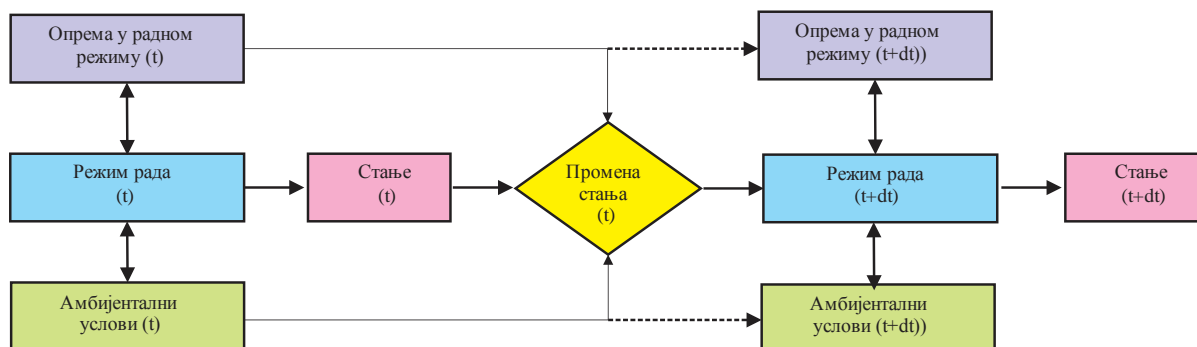
Код опреме која ради дужи низ година, моделовањем се одређују минимални трошкови одржавања и прекиди у испоруци електричне енергије крајњим потрошачима [49, 50]. Анализом различитих стратегија одржавања на примеру енергетског трансформатора утврдиће се комбинација активности које имају за циљ минимизацију трошкова и максималну расположивост енергетског трансформатора [51].

4.2 Дефиниција и модел стања

Квалитативна процена исправности опреме је стање. Модели поузданости се користе да би обезбедили информације о стању опреме и вероватноће да ће опрема вршити функцију циља у одређеном времену. Опрема која се у тренутку t налази у једном радном стању у тренутку $t + dt$ прелази у ново стање. У том тренутку се стање опреме мења услед различитих врста утицаја. Техничка поузданост опреме се добија на основу стања опреме. На слици 4.1 је приказан график промене стања опреме услед промена услова рада [52].

На промене стања опреме утичу режим рада опреме и амбијентални (временски) услови. Амбијентални услови који утичу на промене стања опреме су екстремни временски услови као што су: атмосферска прежњења, ветар, обилне кише итд. Погоршање стања опреме не мора бити само последица експлоатације, већ може бити

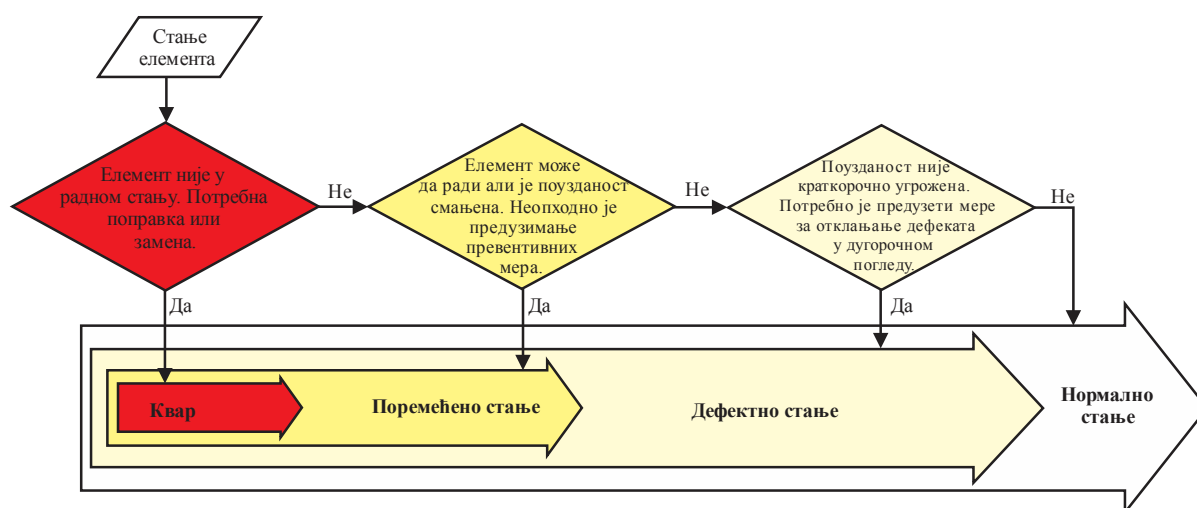
результат лошег одржавања. Спољашњи утицаји као што су временске непогоде, кратки спојеви и окружење не зависе од оператора који ради на одржавању [52].



Слика 4.1 Блок дијаграм процеса промене режима рада услед промене стања [52]

На опреми се у току рада могу идентификовати промене. Опрема се налази у дефектном стању уколико не задовољава пројектовану спецификацију. Поремећено стање се дешава уколико се неки од функционалних захтева не могу испунити. Ако је код опреме озбиљно смањена поузданост, а опрема и даље ради, настаје поремећено стање. То не моранужно да значи да ће убрзо доћи до квара на опреми. Опрема може и даље да функционише, али не испуњава све предвиђене захтеве. Уколико настане квар на опреми, она не може вршити предвиђену функцију циља, тако да је неопходна замена или поправка [53]. Шематски приказ за дефектно стање (*defect*), поремећај (*fault*) и квар (*failure*) дат је на слици 4.2.

Да би се минимизирало погоршање поузданости, код такве критичне опреме је потребно уградити уређаје за континуалан надзор, како би се на време идентификовали дефекти.

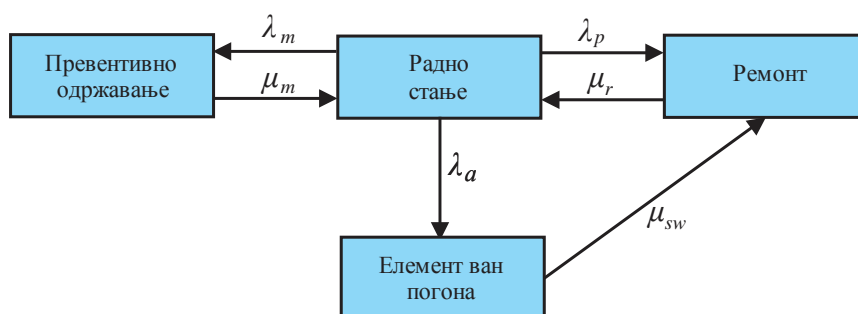


Слика 4.2 Веза између ефеката промене стања и њиховог случајног настанка [52]

4.2.1 Модел стања елемената

Понашање система се може приказати преко дијаграма прелаза. Систем може бити необновљив или обновљив. Код необновљивих система елементи се могу

налазити у два основна стања: радно стање и стање са кваром. Елементи обновљивих система се могу налазити у четири основна стања, и то: радно стање, стање прекида рада због спровођења превентивног одржавања, стање када је елемент ван погона због настанка квара и стање у коме се врши отклањање квара (слика 4.3).



Слика 4.3 Дијаграм прелаза обновљивих система [51]

На слици 4.3 дате су ознаке:

λ_a - интензитет активних кварова,

λ_p - интензитет пасивних кварова,

λ_m - интензитет спровођења превентивног одржавања,

μ_{sw} - интензитет обнављања због настанка квара (прелазак из стања у коме је настао квар у стање отклањања квара),

μ_r - интензитет обнављања отклањања квара,

μ_m - интензитет обнављања спровођења превентивног одржавања.

Интензитет активног квара λ_a се односи на настанак квара и тада се укључују прекидачи за аутоматску заштиту, нпр. при кратком споју. Када се деси догађај активног квара, стање опреме прелази из радног стања у стање када је елемент ван погона, а потом прелази у стање отклањања квара. Стање отклањања квара се врши активностима ручне или аутоматске заштите, са циљем да се изолује елемент на коме је настао квар.

Код настанка пасивних кварова не активирају се уређаји за заштиту, већ опрема из радног стања директно прелази у стање обнављања. На слици је интензитет обнављања отклањања квара обележен са μ_r , где се прелази из стања обнављања у радно стање.

Превентивне активности одржавања елемената спроводе се у складу са стратегијом одржавања која се утврђује у различитим компанијама. Елемент може прелазити из радног стања у стање превентивног одржавања са интензитетом λ_m , а из стања превентивног одржавања у радно стање се враћа са интензитетом обнављања μ_m .

4.3 Најзначајнији кварови који настају на енергетским трансформаторима

Кварови који настају на опреми у постројењима најчешће за последицу имају прекиде или дефиците у испоруци електричне енергије до крајњих потрошача. Штета коју при том трпи дистрибутивно предузеће сразмерна је количини неиспоручене електричне енергије и степену оштећења опреме. Потрошачи трпе штету у зависности

од дужине трајања прекида и структуре потрошње електричне енергије. Кварови који настају на енергетским трансформаторима изазивају најтеже последице, јер њихово отклањање траје дуго и пуно кошта. Због тога њихова расположивост представља важно техничко и економско питање [54].

Отклањање поправљивих кварова на енергетском трансформатору траје релативно кратко и не захтева употребу резервних делова. За отклањање непоправљивих кварова мора се употребити резервни елемент, тако да трајање отклањања зависи и од расположивости тог резервног дела. Набавком резервних елемената знатно се утиче на трајање отклањања квара када до њега дође, али та набавка изискује знатна инвестициона средства [55].

На интензитет кварова енергетског трансформатора може се утицати спровођењем превентивног одржавања одређеног обима или уградњом система за континуални надзор појединих компоненти енергетског трансформатора. При спровођењу превентивног одржавања постоји и могућност суперпозиције квара једног трансформатора на одржавање другог, што, зависно од концепције напајања, може да доведе до потпуног прекида или редукације у напајању потрошача. Због тога је потребно одредити прецизну процедуру за одређивање оптималне комбинације активности и мера која ће обезбедити минималан ниво трошкова и штета током планског периода експлоатације енергетског трансформатора.

Овде ћемо разматрати шест функционалних целина - компоненти енергетског трансформатора:

1. намотаји и уље,
2. језгро,
3. проводни изолатори,
4. котло,
5. регулатор напона,
6. остали прибор.

4.3.1 Модел кварова за групу трансформатора

При прорачуну поузданости групе елемената трансформатора постоје две опције. У првој опцији поузданости елемената се комбинују за сваки елемент трансформатора у посматраној групи. Поузданост групе се изводи из појединачних поузданости сваког елемента. Израчунавањем поузданости групе трансформатора на основу поузданости елемената пружа се могућност избора трансформатора код којих се очекује да ће ускоро отказати неки од елемената.

Друга опција се заснива на одређивању поузданости само елемената у групи трансформатора. У зависности од последица кварова могу се одредити даљи правци програма одржавања. Друга опција се може применити комбиновањем кварова на елементима трансформатора са статистичким расподелама тих елемената.

Укупна поузданост трансформатора подељеног на шест функционалних целина одређује се према [52]:

$$R_{P,tot} = R_{P,nam.i ulja} \times R_{P,jezgro} \times R_{P,iprov.izol.} \times R_{P,kotla} \times R_{P,reg.nap.} \times R_{P,ost.prib.} \quad (4.4)$$

4.4 Развој модела превентивних активности на енергетском трансформатору

Енергетски трансформатор се може налазити у радном или у нерадном стању. Кварови који енергетски трансформатор преводе у нерадно стање могу се поделити на ситне (*minor failures*) и крупне кварове (*major failures*), због којих долази до губитка једне или више функционалних способности трансформатора. Кварови који се могу отклонити за временски период краћи од 24 часа, сматрају се ситним кваровима.

Вероватноћа да се компонента "k" енергетског трансформатора налази у радном стању представљена је мешавином експоненцијалне и *Weibull*-ове расподеле дате у једначини (3.41) [63]:

$$R_k(t) = \exp\left(-(\lambda_{k,mf} + \lambda_{k,MF}) \cdot t\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_k}\right)^{\beta_k}\right) \quad (4.5)$$

где је:

$\lambda_{k,MF}$ - интензитет крупних кварова компоненте "k" енергетског трансформатора,

$\lambda_{k,mf}$ - интензитет ситних кварова компоненте "k" енергетског трансформатора, односно, усвојено је да се из радног у нерадно стање може прећи због случајних кварова и/или због старења елемента респективно.

Према очекиваној дужини трајања отклањања, постоје три категорије кварова [65]:

$i=1$) - кварови се отклањају за $t \leq 1$ дан,

$i=2$) - кварови се отклањају за $1 < t \leq 30$ дана,

$i=3$) - кварови се отклањају за $t > 30$ дана.

У оквиру дисертације ће се анализирати следећи појединачни случајеви и њихове комбинације [66, 67]:

M1) Експлоатација без спровођења превентивног одржавања. У овом случају спроводи се само корективно одржавање.

M2) Једнодневно одржавање. Спроводи се осмочасовно, ($t_{pm}=8h$) током кога се отклањају евентуална оштећења и замењују похабани делови (без отварања котла, где нису обухваћени намотаји, језгро и уље).

M3) Регенерација уља. Усвојено је да ова активност траје $t_{oil}=5$ дана и да ће, такође, бити обављено одржавање као у **M2**). Регенерација уља је поступак током кога се хемијским методама и методама упијања елиминишу киселине и колоидални контаминати, као и субпродукти разлагања уља, ради добијања уља са вредностима параметара веома блиским вредностима параметара новог уља.

M4) Регенерација изолационог система. Усвојено је да ова активност траје $t_{ins}=10$ дана и да ће, такође, бити обављено одржавање као у **M2**). Под регенерацијом изолационог система се подразумева регенерација уља, отклањање нечистоће и сушење папирне изолације циркулацијом сувог топлог уља. Сушењем папирне изолације снижава се концентрација влаге и, првенствено, повећава вредност степена полимеризације папира, чиме се смањује његова "техничка старост".

M5) Ревитализација трансформатора. Након извођења ревитализације, трансформатор има све карактеристике као да је нов. Према истраживањима спроведеним у Европи, САД и Јапану, власници ТС саопштавају да спровођење

ревитализације трансформатора после 25 - 30 година експлоатације кошта 40 - 50% цене новог трансформатора C_{new} . Ако претпоставимо да је ова цена линеарно пропорционална дужини периода експлоатације пре ревитализације, годишња цена ревитализације износи $(0,013 - 0,020) \cdot C_{new} / god$. Такође, усвојено је да ревитализација траје $t_{rev} = 28$ дана. Под ревитализацијом енергетског трансформатора се подразумева утврђивање стања свих функционалних целина и довођење трансформатора у стање "као да је нов" (*as good as new*) поправком и/или заменом похабаних делова регулатора напона, вентилатора и пумпи, регенерацијом или заменом уља и делова папирне изолације, заменом намотаја, притезањем језгра, отклањањем корозије и фарбањем котла, итд.

M6) *Уградња система за континуални надзор* компоненти енергетског трансформатора. Очекивани век експлоатације комерцијално доступних система износи 10 година, а набавна цена је око 10% набавне цене одговарајуће компоненте. У доступној литератури цена и трајање детектованих кварова се занемарују. Из разлога сигурности, усвојено је да се детектовани кварови на намотајима и језгру отклањају за 5 дана по цени од 5000 EUR, док се на осталим компонентама отклањају као ситни кварови.

M7) *Одређивање оптималне количине резервне опреме.*

M8) *Оптимизација резервних делова.* За сваку претходно наведену активност (меру) биће утврђена економска оправданост спровођења, а затим ће бити утврђена оптимална комбинација која обезбеђује минималне годишње трошкове и штете.

M1) *Корективно одржавање* се спроводи за случај погона без држања резервне опреме и без одржавања. Трошкови током планског периода експлоатације састоје се само од трошкова отклањања квара. Очекивана годишња вредност ових трошкова по једном трансформатору, током периода $(t, t+1)$ може се проценити из израза [63]:

$$C_{ET,b}(t, t+1) = \frac{[R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot C'_{k,i} \right)}{\int_t^{t+1} R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i}}, \quad R_{tot}(t) = \prod_{k=1}^b R_k(t), \quad (4.6)$$

где су:

$C'_{k,i}$ - цена отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када компонента "k" није расположива као резерва,

R_{tot} - функција поузданости (неотказивости) трансформатора

R_k - функција поузданости (неотказивости) компоненте трансформатора

p_k - релативни удео кварова компоненте "k" у укупном броју кварова енергетског трансформатора,

$p_{k,i}$ - релативни удео категорије квара "i" у укупном броју кварова компоненте "k" енергетског трансформатора,

$r'_{k,i}$ - време трајања отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када компонента "k" није расположива као резерва,

b - број функционалних целина (компоненти) енергетског трансформатора.

Очекивана годишња нерасположивост добија се као:

$$U_{ET,b}(t,t+1) = \frac{[R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right)}{\int_t^{t+1} R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i}}. \quad (4.7)$$

Очекивана годишња трајања прекида због испада једног трансформатора и због испада оба трансформатора током периода $(t, t+1)$ су:

$$\begin{aligned} \tau_{1,b}(t,t+1) &= U_{ET,b}(t,t+1) \cdot 8760 [h], \\ \tau_{2,b}(t,t+1) &= U_{ET,b}(t,t+1)^2 \cdot 8760 [h] \end{aligned} \quad (4.8)$$

M2) Једнодневно одржавање. Ако се до тренутка m није догодио квар, биће спроведено једнодневно одржавање. Очекивани трошкови током прве године након спровођења одржавања израчунавају се као:

$$C_{ET,nosp.-1daypm}(m,m+1) = \frac{E(m) \cdot [R_{tot}(m) - R_{tot}(m+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot C'_{k,i} \right)}{Im(m,m+1)} + \frac{R_{tot}(m) \cdot C_{pm}}{X(m)} \quad (4.9)$$

$$E(m) = \exp \left[\sum_{k=3}^b (\lambda_{k,mf} + \lambda_{k,MF}) \cdot m \right]$$

$$Im(m,m+1) = R_{tot}(m) \cdot t_{pm} + E(m) \cdot \left\{ \int_t^{t+1} R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(m) - R_{tot}(m+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right\}$$

$$\begin{aligned} X(m) &= \int_0^m R_{tot}(t) \cdot dt + [1 - R_{tot}(m)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} + \\ &+ E(m) \cdot \left\{ \int_m^N R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(m) - R_{tot}(N)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X(m) &= \int_0^m R_{tot}(t) \cdot dt + [1 - R_{tot}(m)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \\ &+ E(m) \cdot \left\{ \int_m^N R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(m) - R_{tot}(N)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right\}, \end{aligned}$$

где је:

C_{pm} - цена спровођења једнодневног превентивног одржавања

Очекивана годишња нерасположивост трансформатора током прве године после спровођења одржавања биће:

$$U_{ET,no-sp.-1day-pm}(m,m+1) = \underbrace{\frac{E(m) \cdot [R_{tot}(m) - R_{tot}(m+1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right)}{I_m(m,m+1)}}_{U_m} + \underbrace{R_{tot}(m) \cdot t_{pm}}_{U'_m}, \quad (4.10)$$

Ако је испуњен критеријум " $n-1$ " сигурности, члан U_m нема утицаја. У осталим случајевима, осим прекида напајања због једновремених кварова на оба трансформатора, мора се узети у обзир и суперпозиција квара једног трансформатора

на одржавање другог. Дакле, очекивано трајање прекида $\tau_{2,f-m}(m)$ напајања потрошача због суперпозиције квара на одржавање износи:

$$\tau_{2,f-m}(m) = U_m \cdot U_m^n \cdot 8760 [h]. \quad (4.11)$$

M3) Регенерација уља биће спроведена ако се до тренутка T_{oil} није догодио квар. Очекивани трошкови $C_{ET,no-sp-reg-oil}(T_{oil}, T_{oil} + 1)$ и нерасположивост $U_{ET,no-sp-reg-oil}(T_{oil}, T_{oil} + 1)$ током прве године након спровођења регенерације уља, као и очекивано трајање прекида $\tau_{2,f-T_{oil}}(T_{oil})$ напајања потрошача због суперпозиције квара на регенерацију уља, израчунавају се према изразима (4.9) - (4.11) при чему се уместо фактора корекције $E(m)$ користи фактор $E(T_{oil})$:

$$E(T_{oil}) = \exp \left[\sum_{k=1}^b (\lambda_{k,mf} + \lambda_{k,MF}) \cdot T_{oil} \right]. \quad (4.12)$$

M4) Регенерација изолационог система. Побољшање у односу на регенерацију уља је што се смањује "техничка старост" папирне изолације за $x = (20 \pm 30)\%$.

Дакле, после регенерације неотказивост компоненте $k=1$ ће се мењати према изразу:

$$R_{1,reg}(t) = \exp[-(\lambda_{1,mf} + \lambda_{1,MF}) \cdot (t - T_{reg})] \cdot \exp \left[- \left(\frac{t \cdot (1-x)}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right], \quad (4.13)$$

а поузданост трансформатора као целине:

$$R_{t,reg}(t) = R_{1,reg}(t) \cdot \sum_{k=2}^b R_k(t). \quad (4.14)$$

У свему осталом прорачун је идентичан прорачунима за случајеве **M2)** и **M3)**.

M5) Спровођењем ревитализације трансформатора, завршава се један циклус и почиње други, када трансформатор има све особине као да је нов. Тренутак спровођења ревитализације T_{rev} се одређује тако да током прве године после ревитализације очекивани трошкови и штете буду мањи од трошкова и штета за случај да ревитализација није обављена.

Очекивани трошкови током прве године после спровођења ревитализације, за случај погона без држања резервне опреме, биће:

$$C_{ET,no-sp-transf.-ref.}(T_{ref}, T_{ref} + 1) = \frac{[1 - R_{tot}(1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot C'_{k,i} \right)}{R_{tot}(T_{ref}) \cdot t_{ref} + \int_0^1 R_{tot}(t) \cdot dt + [1 - R_{tot}(1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i}} + \frac{R_{tot}(T_{ref}) \cdot C_{ref}(T_{ref})}{R_{tot}(T_{ref}) \cdot t_{ref} + \int_0^{T_{ref}} R_{tot}(t) \cdot dt + [1 - R_{tot}(T_{ref})] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i}}. \quad (4.15)$$

Очекивана годишња нерасположивост трансформатора током прве године после спровођења ревитализације биће:

$$U_{ET, no-sp.-transf.-ref.}(T_{ref}, T_{ref} + 1) = \frac{[1 - R_{tot}(1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \left(\sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right)}{R_{tot}(T_{ref}) \cdot t_{ref} + \int_0^1 R_{tot}(t) \cdot dt + [1 - R_{tot}(1)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i}} + \underbrace{R_{tot}(T_{ref}) \cdot t_{ref}}_{U_{ref}} \quad (4.16)$$

M6) Уградњом система за континуални надзор компоненти енергетског трансформатора омогућава се детекција кварова у најранијој фази развоја. Тиме се повећава интензитет ситних, а смањује интензитет крупних кварова посматране компоненте. Снижење интензитета крупних кварова има за последицу повећање параметра размере *Weibull*-ове расподеле.

Уколико означимо са $\alpha'_k, k = \overline{1,2}$, параметре размере намотаја и језгра после уградње система за континуални надзор, систем се, по претпоставци, уграђује после T_s година погона без кварова.

Неотказивост трансформатора током следећих 10 година експлоатације ће се мењати према изразу:

$$R'_{tot}(t) \approx R_1(T_s) \cdot R_2(T_s) \cdot R'_1(t - T_s) \cdot R'_2(t - T_s) \cdot \prod_{k=3}^b R_k(t), \quad (4.17)$$

$$R'_k(t - T_s) = \exp[-(\lambda'_{k, MF} + \lambda'_{k, mf}) \cdot (t - T_s)] \cdot \exp\left[-\left(\frac{t - T_s}{\alpha'_k}\right)^{\beta_k}\right], k = \overline{1,2}. \quad (4.18)$$

Очекивани трошкови и нерасположивост током прве године после прве уградње система за континуални надзор израчунавају се као:

$$C_{ET, no-sp.-cond.mon.sys.}(T_s, T_s + 1) = \frac{(R'_{tot}(T_s) - R'_{tot}(T_s + 1)) \cdot \left(\sum_{j=1}^2 p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i}^{CMS} \cdot C_{j,i}^{CMS-b} + \sum_{k=3}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot C'_{k,i} \right)}{Im_{CMS}(T_s, T_s + 1)} + \frac{R_{tot}(T_s) \cdot C_{s,1-2}}{\int_{T_s}^{T_s+10} R'_{tot}(t) \cdot dt + (R'_{tot}(T_s) - R'_{tot}(T_s + 10)) \cdot \left(\sum_{j=1}^2 p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i}^{CMS} \cdot r_{j,i}^{CMS-b} + \sum_{k=3}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right)} + C_{m-cond.mon.sys.} \quad (4.19)$$

$$U_{ET, no-sp.-cond.mon.sys.}(T_s, T_s + 1) = \frac{(R'_{tot}(T_s) - R'_{tot}(T_s + 1)) \cdot \left(\sum_{j=1}^2 p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i}^{CMS} \cdot r_{j,i}^{CMS-b} + \sum_{k=3}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right)}{Im_{CMS}(T_s, T_s + 1)}, \quad (4.20)$$

$$Im_{CMS}(T_s, T_s + 1) = \int_{T_s}^{T_s+1} R'_{tot}(t) \cdot dt + (R'_{tot}(T_s) - R'_{tot}(T_s + 1)) \cdot \left(\sum_{j=1}^2 p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i}^{CMS} \cdot r_{j,i}^{CMS-b} + \sum_{k=3}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r'_{k,i} \right), \quad (4.21)$$

где је:

$C'_{k,i}$ - цена отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када компонента "k" није расположива као резерва,

- $C_{k,i}^{CMS-b}$ - цена отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када је уграђен систем за континуални надзор, а компонента "k" није расположива као резерва,
- $r_{k,i}^{CMS-b}$ - време трајања отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када је уграђен систем за континуални надзор, а компонента "k" није расположива као резерва,
- $r_{k,i}''$ - време трајања отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када је компонента "k" расположива као резерва,
- $p_{k,i}^{CMS}$ - релативни удео категорије квара "i" у укупном броју кварова компоненте "k" енергетског трансформатора након уградње система за континуални надзор,
- $C_{m-cond.mon.sys.}$ - годишњи трошкови одржавања система за континуални надзор.

M7) Одређивање оптималне количине резервне опреме. За случај погона без држања резервне опреме, спровођења ревитализације и уградње система за континуални надзор, трошкови током планског периода експлоатације састоје се само од трошкова отклањања квара. Очекивана годишња вредност ових трошкова по једном трансформатору и нерасположивост током периода $(t, t+1)$ могу се проценити из израза (4.6) и (4.7).

Куповином резервне опреме свесно се повећавају експлоатациони трошкови да би се снизила нерасположивост трансформатора, односно штета коју ће испоручилац да претрпи због неиспоручене електричне енергије. Утицај резервне опреме набављене у тренутку T_j периода експлоатације обухвата се на следећи начин: ако се до тренутка T_j догоди квар он ће бити отклоњен, а ако не, у тренутку T_j биће купљена резервна компонента j енергетског трансформатора. Тада изрази (4.6) и (4.7) постају, за $t \geq T_j$:

$$C_{ET,s}(t, t+1) = \frac{[R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \left(p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i} \cdot C_{j,i}'' + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot C_{k,i}' \right)}{\int_t^{t+1} R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \left(p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i} \cdot r_{j,i}'' + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r_{k,i}' \right)} + \frac{R_{tot}(T_j) \cdot C_{new,j}}{\int_0^N R_{tot}(t) \cdot dt + U_I(0, N)}, \quad (4.22)$$

$$U_{ET,s}(t, t+1) = \frac{[R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \left(p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i} \cdot r_{j,i}'' + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r_{k,i}' \right)}{\int_t^{t+1} R_{tot}(t) \cdot dt + [R_{tot}(t) - R_{tot}(t+1)] \cdot \left(p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i} \cdot r_{j,i}'' + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r_{k,i}' \right)}, \quad (4.23)$$

$$U_I(0, N) = [1 - R_{tot}(T_j)] \cdot \sum_{k=1}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r_{k,i}' + [R_{tot}(T_j) - R_{tot}(N)] \cdot \left(p_j \sum_{i=1}^{f_j} p_{j,i} \cdot r_{j,i}'' + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^b p_k \sum_{i=1}^{f_k} p_{k,i} \cdot r_{k,i}' \right), \quad (4.24)$$

где су:

$r_{k,i}''$ - време трајања отклањања квара "i" на компоненти "k" енергетског трансформатора за случај када је компонента "k" расположива као резерва,

$C_{new,k}$ - набавна цена компоненте "k" енергетског трансформатора.

Очекивана годишња трајања испада једног трансформатора и оба трансформатора током периода $(t, t+1)$, за случај држања резервне опреме, су:

$$\begin{aligned}\tau_{1,s}(t, t+1) &= U_{ET,s}(t, t+1) \cdot 8760 \quad [h], \\ \tau_{2,s}(t, t+1) &= U_{ET,b}(t, t+1) \cdot U_{ET,s}(t, t+1) \cdot 8760 \quad [h]\end{aligned}\tag{4.25}$$

M8) Одређивање оптималне комбинације активности и мера.

Корак 1) Израчунајмо и означимо са $Z_{M_1}(t, t+1), t = \overline{1, N-1}$, укупну вредност трошкова и штета које настају током периода $(t, t+1)$ за случај погона без држања резервне опреме, без уграђених система за континуални надзор и без спровођења одржавања. Ово су почетне - референтне вредности на основу којих ће бити спроведене прелиминарне анализе из корака 2).

Корак 2) За све активности $M_k, k = \overline{2, 7}$ израчунати вредности $Z_{M_k}(t, t+1)$. Поређењем ових вредности са вредностима $Z_{M_1}(t, t+1), t = \overline{1, N-1}$, биће утврђен тренутак t_{1k} када је исплативо реализовати први пут сваку од активности M_k појединачно (активност је исплатива ако је $Z_{M_k}(t_{1k}, t_{1k}+1) < Z_{M_1}(t_{1k}, t_{1k}+1)$). За нове референтне вредности усваја се низ $Z_{M_k}(t, t+1)$ који одговара активности чије је спровођење оправдано најраније од свих осталих. Ако је добијено да је спровођење више појединачних активности оправдано од истог тренутка t_a тада се за референтне вредности усваја низ $Z_{M_k}(t, t+1)$ који у периоду (t_a, N) омогућава највећу уштеду. На овај начин је утврђена активност A_1 која ће прва бити спроведена као и активности чије је спровођење потенцијално оправдано.

Корак 3) Под претпоставком да је спроведена активност A_1 врши се утврђивање друге активности A_2 чије је спровођење оправдано у тренутку t_b ($t_b \geq t_a$).

Корак 4) Под претпоставком да су спроведене активност A_1 у тренутку t_a и активност A_2 у тренутку t_b врши се утврђивање треће активности A_3 чије је спровођење оправдано у тренутку t_c ($t_c \geq t_b$), итд.

5. ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНЕ КОМБИНАЦИЈЕ ПОЈЕДИНИХ МЕРА И ПРЕВЕНТИВНИХ АКТИВНОСТИ

5.1 Увод

На основу модела који су дати у претходном поглављу, биће одређена оптимална комбинација појединих мера и превентивних активности које треба спровести на трансформатору. На овај начин ће се утврдити величине штета и трошкова које настају за све предложене активности. Као резултат ће се одредити оптимално време набавке резервног дела сваког елемената трансформатора, као и економска исплативост уградње система за континуални надзор на појединим елементима [68, 69].

Набавком резервних делова код трансформатора, време трајања кvara се знатно скраћује. Међутим, држање резервне опреме утиче на трошкове набавке и трошкове складиштења. Уштеде које се остварују набавком резервне опреме од прве године рада трансформатора нису увек довољне да би се оправдала улагања. Због тога је потребно извршити оптимизацију тренутка набавке резервних делова, чиме се обезбеђују минимални трошкови.

Поред набавке резервне опреме, на смањење трошкова утичу и уградња система за континуални надзор. Последњих година са развојем различитих врста сензора и информационих технологија, омогућено је смањење активности превентивног одржавања. Услед настанка било каквих промена на опреми, добијају се подаци који указују да је потребна превентивна интервенција. Због тога се разматра оптимално време уградње система за континуални надзор на сваком критичном елементу трансформатора, како би трошкови били минимални [70, 71].

5.2 Подаци о трошковима и кваровима енергетских трансформатора

Трансформатори су једна од најважнијих компоненти у раду дистрибутивног система. Значајно је утврдити колики су трошкови одржавања трансформатора и на време спречити настанак кварова применом превентивних експлоатационих активности [72].

У Табели 5.1 дати су подаци о уделу појединих компоненти у укупном броју кварова енергетских трансформатора, као и времена трајања отклањања појединих категорија кварова. Вредности степена детектованих кварова наведене су у Табели 5.2. У истој табели дате су и набавне цене компоненти енергетског трансформатора 110kV, 110/x kV/kV, 31,5MVA.

Усвојено је да је цена неиспоручене електричне енергије $C_{EN} = 0,10 \text{ EUR/kWh}$. За трајање ревитализације усвојено је да износи $t_{rev} = 28$ дана.

Цена филтрирања и сушења уља је $C_U = 0,2 \cdot C_{new,oil}$. Цена спровођења једнодневног одржавања износи $C_{pm} = 100 \text{ EUR}$, цена регенерације уља $C_{reg-oil} = 8000 \text{ EUR}$, цена регенерације изолације $C_{reg-ins} = 10000 \text{ EUR}$, процентуални удео смањења "техничке старости" папирне изолације $x = 0,3$.

Табела 5.1 Удео компоненти у укупном броју кварова е-нергетских трансформатора и време трајања отклањања појединих категорија кварова

Компонента	$p_k, \%$	“Категорија” квара према трајању	$p_{k,i}, \%$	Трајање квара без резервне опreme, $r_{k,i}$	Трајање квара са резервном опремом, $r_{k,i}''$
1) Намотаји + уље	26,4	≤ 30 дана	14,54	30	15
		> 30 дана	85,46	250	15
2) Језгро	2,4	$1 \div 30$ дана	50,00	30	15
		> 30 дана	50,00	180	15
3) Проводни изолатори	12,0	≤ 1 дан	14,82	1	1
		$1 \div 30$ дана	51,85	40	3
		> 30 дана	33,33	40	15
4) Котао	7,9	≤ 1 дан	58,82	1	1
		$1 \div 30$ дана	23,53	3	3
		> 30 дана	17,65	90	15
5) Регулатор напона	40,7	≤ 1 дан	25,61	1	1
		$1 \div 30$ дана	52,44	3	3
		> 30 дана	21,95	40	3
6) Остало	10,6	≤ 1 дан	65,22	1	1
		$1 \div 30$ дана	17,39	15	15
		> 30 дана	17,39	40	15

Табела 5.2 Вредности степена детектованих кварова и цене нових елемената TS 110/x kV/kV

Компонента	Степен детекције $d_k [\%]$	Цена $C_{new,k}$ [EUR]
1) Намотаји+уље	70	250 000+ 40 000
2) Језгро	70	80 000
3) Проводни изолатори	80	800
4) Котао	-	28 000
5) Регулатор напона	75	42 000
6) Остало	100	22 000

Набавна цена система за континуални надзор износи 10% цене компоненте на коју се систем уграђује: $C_{s,k} = 0,1 \cdot C_{new,k}$. Годишње одржавање система за континуални надзор је 1% набавне цене. У Табели 5.3 дате су цене отклањања појединих категорија кварова на компонентама.

Примена предложеног модела је илустрована на примеру једне TS 110/x kV/kV, у којој су инсталирана два енергетска трансформатора од по 31,5 MVA. Линеаризовани годишњи дијаграм трајања оптерећења за анализирану TS је приказан на слици 5.1. Максимално оптерећење износи 80%, а минимално 40% инсталисане снаге, $P_{inst} = 2 \cdot 31,5 = 63 \text{ MVA}$.

Табела 5.3 Цене отклањања појединих категорија кварова на компонентама енергетског трансформатора

Компонента	$p_k, \%$	“Категорија” квара према трајању	Цена отклањања квара без резервне опреме $C'_{k,i}$	Цена отклањања квара са резервном опремом $C''_{k,i}$
1) Намотаји + уље	26,4	≤ 30 дана	$0,2 \cdot C_{new,1} + C_u$	C_u
		> 30 дана	$0,5 \cdot C_{new,1} + C_u$	C_u
2) Језгро	2,4	$1 \div 30$ дана	$0,2 \cdot C_{new,2} + C_u$	C_u
		> 30 дана	$0,5 \cdot C_{new,2} + C_u$	C_u
3) Проводни изолатори	12,0	≤ 1 дан	$0,4 \cdot C_{new,3}$	$0,4 \cdot C_{new,3}$
		$1 \div 30$ дана	$C_{new,3}$	-
		> 30 дана	$C_{new,3} + C_u$	C_u
4) Котао	7,9	≤ 1 дан	$0,1 \cdot C_{new,4}$	$0,1 \cdot C_{new,4}$
		$1 \div 30$ дана	$0,2 \cdot C_{new,4}$	$0,2 \cdot C_{new,4}$
		> 30 дана	$C_{new,4} + C_u$	C_u
5) Регулатор напона	40,7	≤ 1 дан	$0,1 \cdot C_{new,5}$	$0,1 \cdot C_{new,5}$
		$1 \div 30$ дана	$0,2 \cdot C_{new,5}$	$0,2 \cdot C_{new,5}$
		> 30 дана	$0,4 \cdot C_{new,5}$	-
б) Остало	10,6	≤ 1 дан	$0,1 \cdot C_{new,6}$	$0,1 \cdot C_{new,6}$
		$1 \div 30$ дана	$0,5 \cdot C_{new,6}$	$0,5 \cdot C_{new,6}$
		> 30 дана	$C_{new,6}$	-

Просечна годишња штета због неиспоручене електричне енергије је:

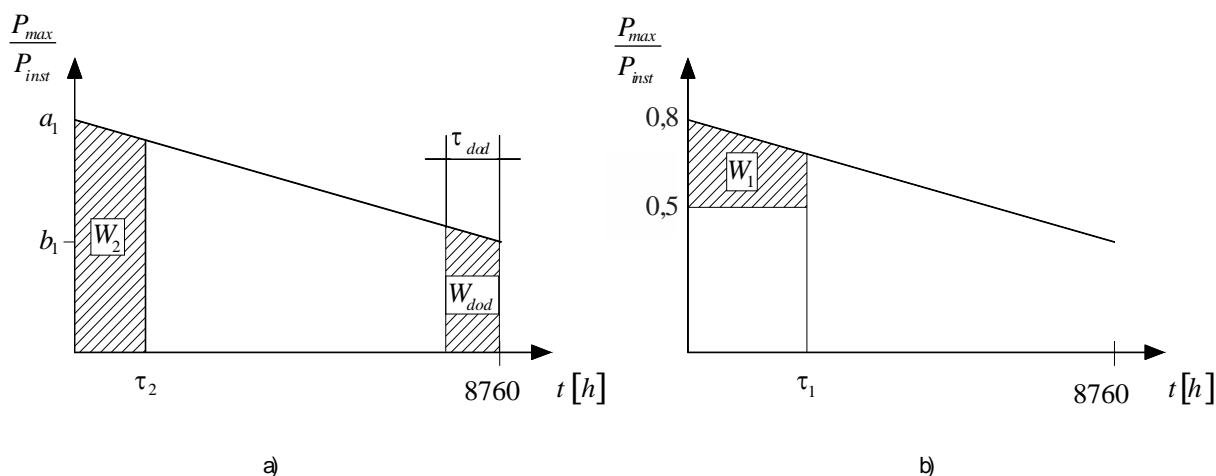
$$W(t, t+1) = C_{EN} \cdot [W_1 + W_2 + W_{dod}] \quad [EUR / god] \quad (5.10)$$

где су:

$W_1(t, t+1)$, $W_2(t, t+1)$ - очекивана неиспоручена електрична енергија током периода $(t, t+1)$ због испада једног трансформатора и због једновременог испада оба трансформатора, респективно,

$W_{dod}(t, t+1)$ - очекивана неиспоручена електрична енергија током периода $(t, t+1)$ због суперпозиције одржавања на квар.

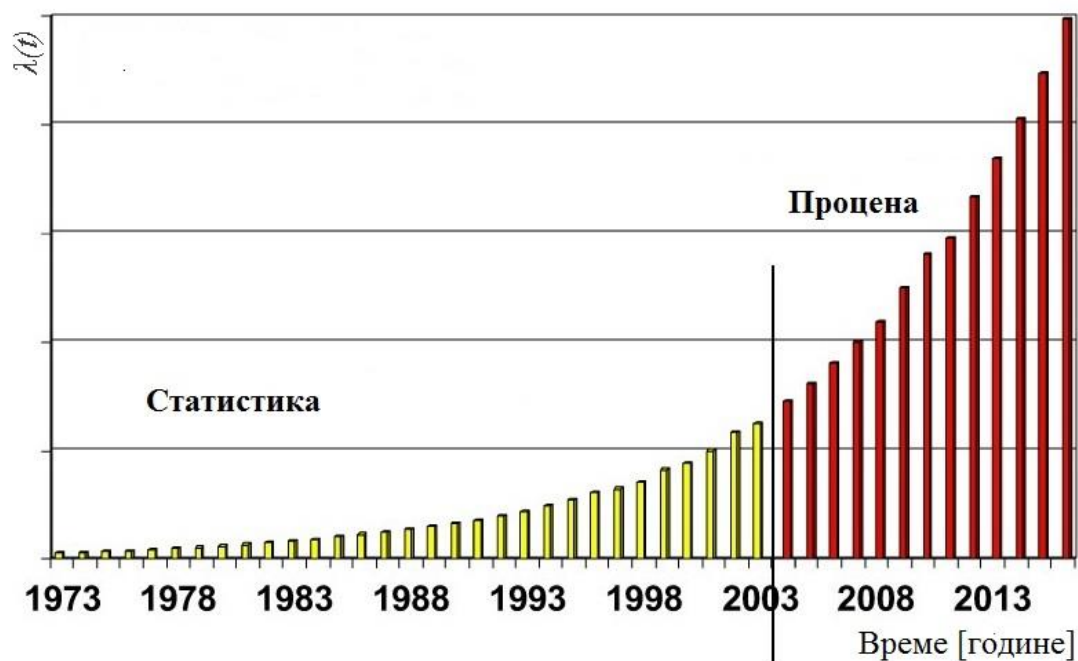
Параметри расподела одређени су на основу експлоатационих података о годишњем интензитету крупних кварова енергетских трансформатора у САД (слика 5.1) [64]. За усвојену средњу вредност интензитета кварова енергетског трансформатора од $\lambda_{av} = 0,015 \text{ 1/god}$ за првих 30 година експлоатације, на основу криве са слике 5.1 и података наведених у Табели 5.1, методом минимума суме квадрата одступања добијају се параметри Weibull-ове расподеле за поједине компоненте (Табела 5.4). У истој табели наведене су вредности параметара размере за случај да је на свакој компоненти појединачно уграђен систем за континуални надзор, а на основу криве са слике 5.2, података из Табеле 5.1 и Табеле 5.2 [63].



Слика 5.1 Линеаризовани годишњи дијаграм трајања оптерећења ($a_1 = 0,8, b_1 = 0,4$)

Табела 5.4 Параметри Weibull-ове расподеле за поједине компоненте

k	Компонента	β_k	Без континуалног надзора α_k	Са континуалним надзором α'_k
1	Намотаји + уље	3,58	57,013	79,805
2	Језгро	3,58	111,395	155,927
3	Проводни изолатор	3,58	74,316	116,500
4	Котао	3,58	102,321	102,321
5	Регулатор напона	3,58	54,872	80,213
6	Остали прибор	3,58	98,808	∞

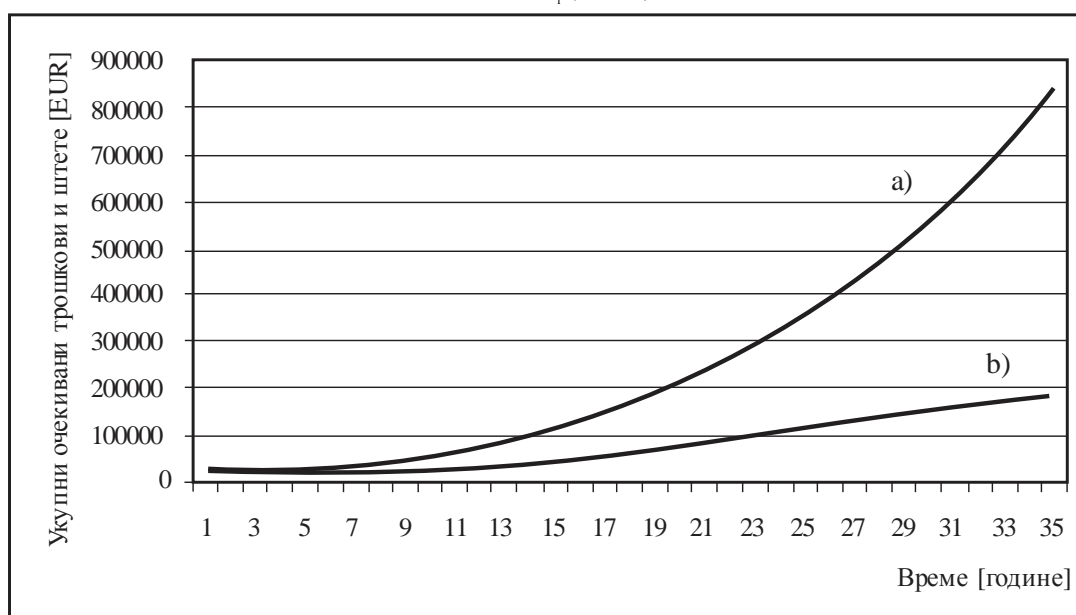


Слика 5.2 Статистички подаци о интензитету $\lambda_{i, MF}^0$ крупних кварова у периоду 1973. - 2003. и процена за период 2004. - 2015. [65]

5.3 Резултати анализа трошкова и штета применом различитих активности на елементима енергетских трансформатора

5.3.1 Случај радијалног напајања потрошача

Активност A_1 - Уградња система за континуални надзор намотаја и језгра - У првом кораку израчунава се да је оправдано од 1. године уградити системе за континуални надзор намотаја и језгра. Имајући у виду очекивани период експлоатације поменутих система, ови се уграђују на сваких десет година и то: почетком 11., 21. и 31. године периода експлоатације. На слици 5.3 приказане су вредности укупних очекиваних трошкова и штета на годишњем нивоу за случај **M1**), $Z_{M1}(t, t+1)$ (крива a)), и за случај да је спроведена активност A_1 , $Z_{A_1}(t, t+1)$ (крива b)) [65].



Слика 5.3. Укупни очекивани трошкови и штете током периода $(t, t+1)$ за случај **M1**) (крива a)) и за случај да је спроведена активност A_1 (крива b))

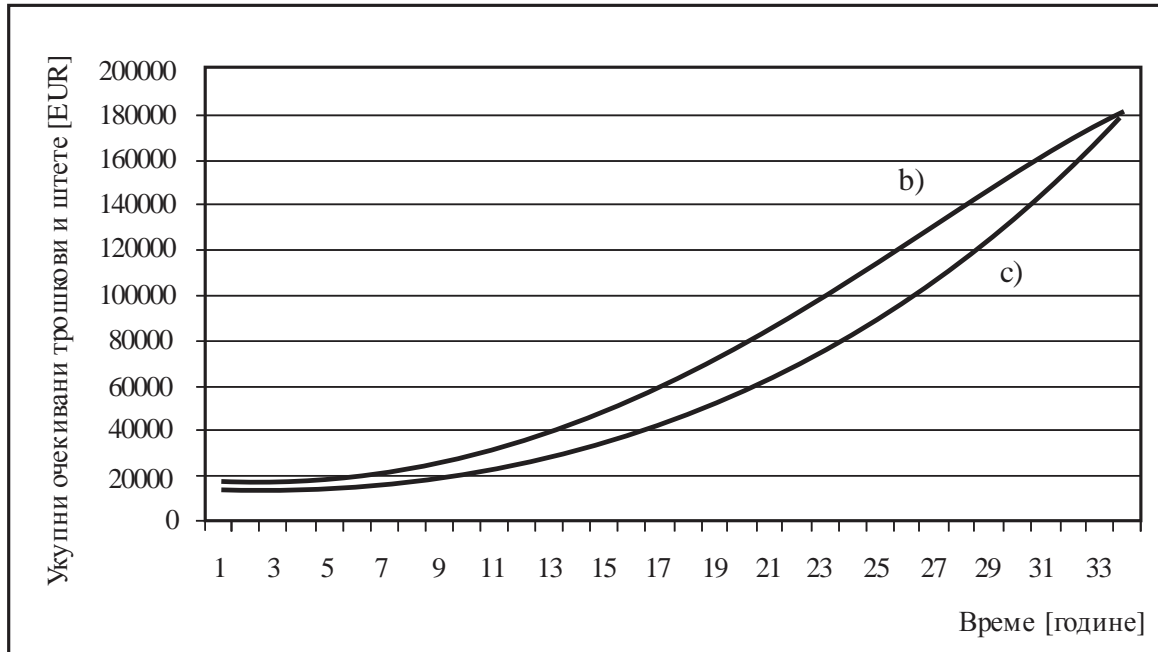
Активност A_2 - Уградња система за континуални надзор проводних изолатора - У другом кораку вршимо анализе оправданости спровођења осталих мера и активности, под претпоставком да је активност A_1 спроведена. Уградња система за континуални надзор проводних изолатора врши се од 1. године периода експлоатације. Вредности $Z_{A_1}(t, t+1)$ (крива b)) и $Z_{A_1+A_2}(t, t+1)$ (крива c)) дате су на слици 5.4.

Ради потпуности, важно је нагласити да после спровођења активности A_1 и A_2 , током планског периода од 40 година, није оправдано спроводити ни једнодневно одржавање, ни регенерацију уља, ни регенерацију изолационог система. Преостаје да се изврши анализа оправданости набавке резервне опреме и оправданости спровођења ревитализације енергетског трансформатора.

Прорачуни показују да је за случај без држања резервне опреме спровођење ревитализације оправдано после 14. године периода експлоатације. С друге стране, анализа само набавке резервне опреме показује да је оправдано набавити [63]:

- резервни регулатор напона од почетка 9. године,

- резервне намотаје од почетка 10. године,
- резервни котао од почетка 14. године,
- резервни остали прибор од почетка 15. године и
- резервно језгро од почетка 27. године.



Слика 5.4. Укупни очекивани трошкови и штете током периода $(t, t+1)$ за случај да је спроведена активност A_1 (крива b)) и за случај да су спроведене активности A_1 и A_2 (крива c))

Активност A_3 - Набавка резервне опреме - Поступном анализом једноставно се израчунава да је оправдано [63]:

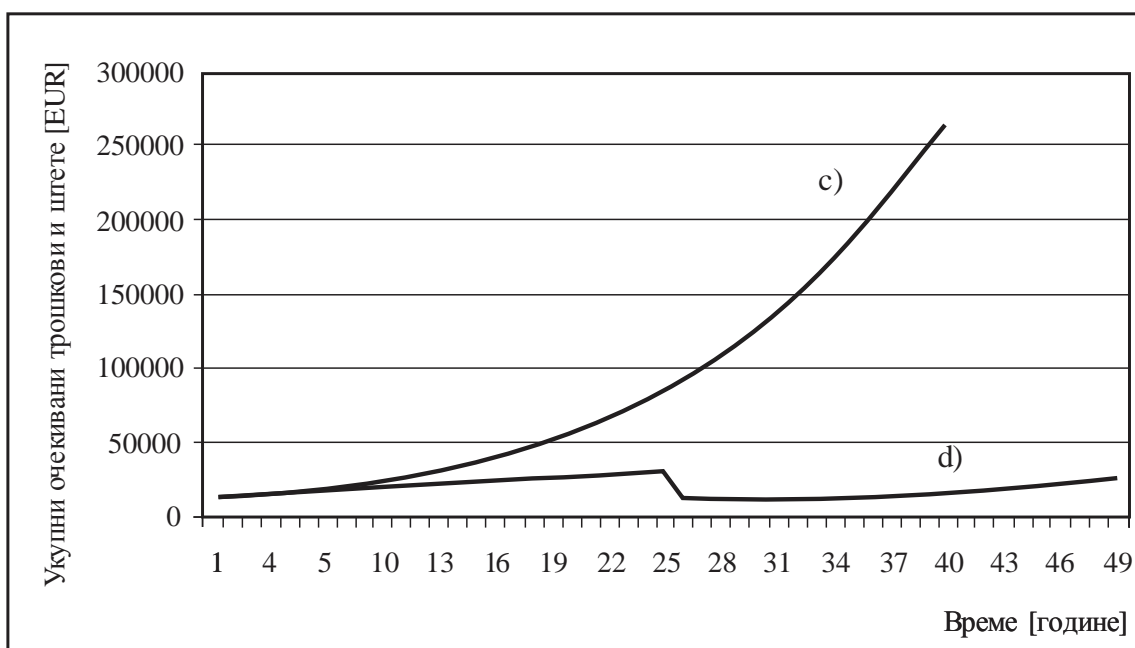
*) набавити:

- резервни регулатор напона од почетка 9. године,
- резервне намотаје од почетка 10. године,
- резервни котао од почетка 14. године,
- резервни остали прибор од почетка 15. године и

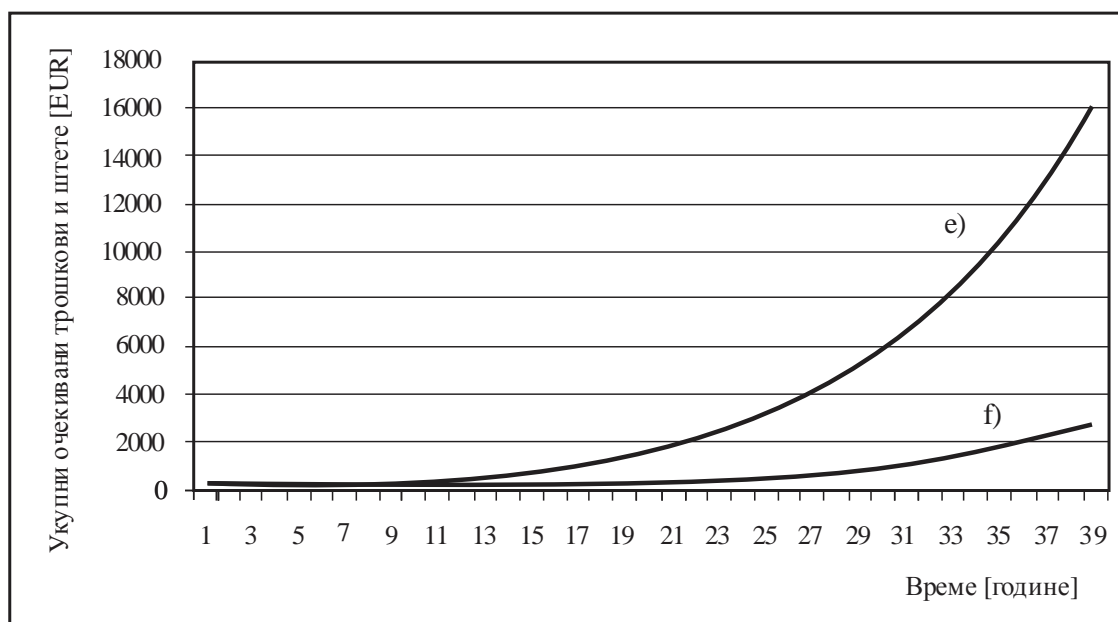
*) спровести ревитализацију трансформатора на почетку 25. године.

На овај начин се елиминише потреба набавке резервног језгра. Вредности $Z_{A_1+A_2}(t, t+1)$ (крива c)) и $Z_{A_1+A_2+A_3}(t, t+1)$ (крива d)) дате су на слици 5.5.

Активност A_4 - Уградња система за континуални надзор проводних изолатора за случај да је испуњен критеријум "n-1" сигурности - Означимо са $Z_{M1(n-1)}(t, t+1)$ очекиване трошкове и штете за случај спровођења модела **M1**). Набавка резервне опреме није оправдана нити спровођење било ког вида превентивног одржавања. На слици 5.6 дат је упоредни преглед вредности $Z_{M1(n-1)}(t, t+1)$ (крива e)) и $Z_{A_4}(t, t+1)$ (крива f)).



Слика 5.5 Укупни очекивани трошкови и штете током периода $(t, t + 1)$ за случај да су спроведене активности A_1 и A_2 (крива c)) и за случај да су спроведене активности A_1 , A_2 и A_3 (крива d))



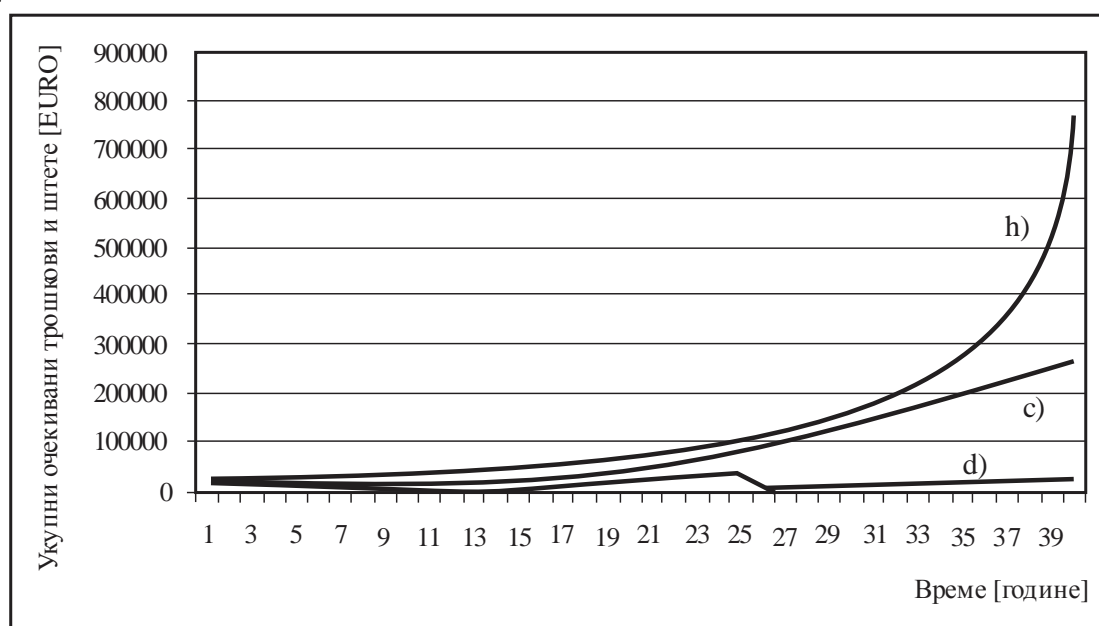
Слика 5.6 Укупни очекивани трошкови и штете током периода $(t, t + 1)$ за случај **M1** и критеријум " $n - 1$ " сигурности (крива e)) и за случај да је спроведена активност A_4 (крива f))

Показано је да се са релативно малим улагањима могу постићи велике уштеде. Примера ради, ако бисмо вршили одређивање само оптималне количине резервне опреме добили бисмо, за случај радијалног напајања, следеће [65]:

- набавка резервних намотаја је оправдана од 1. године.

- набавка резервних проводних изолатора је, такође, оправдана од 1. године.
- набавка резервног регулатора напона је оправдана од 7. године.
- набавка резервног котла је оправдана од 11. године.
- набавка резервног осталог прибора је оправдана од 13. године.
- набавка резервног језгра је оправдана од 15. године.

Захваљујући употреби система за континуални надзор, омогућено је да се резервне компоненте купе знатно касније при чему нема потребе набављати резервно језгро. На слици 5.7 дат је упоредни преглед укупних очекиваних трошкова и штета током периода $(t, t+1)$ за случај држања оптималне количине резервне опреме (без примене система за континуални надзор) (крива h)), за случај да су спроведене активности A_1 и A_2 (крива c)) и за случај да су спроведене активности A_1 , A_2 и A_3 (крива d)).



Слика 5.7 Упоредни преглед укупних очекиваних трошкова и штета током периода $(t, t+1)$ за случај држања оптималне количине резервне опреме (без примене система за континуални надзор) (крива h)), за случај да су спроведене активности A_1 и A_2 (крива c)) и за случај да су спроведене активности A_1 , A_2 и A_3 (крива d))

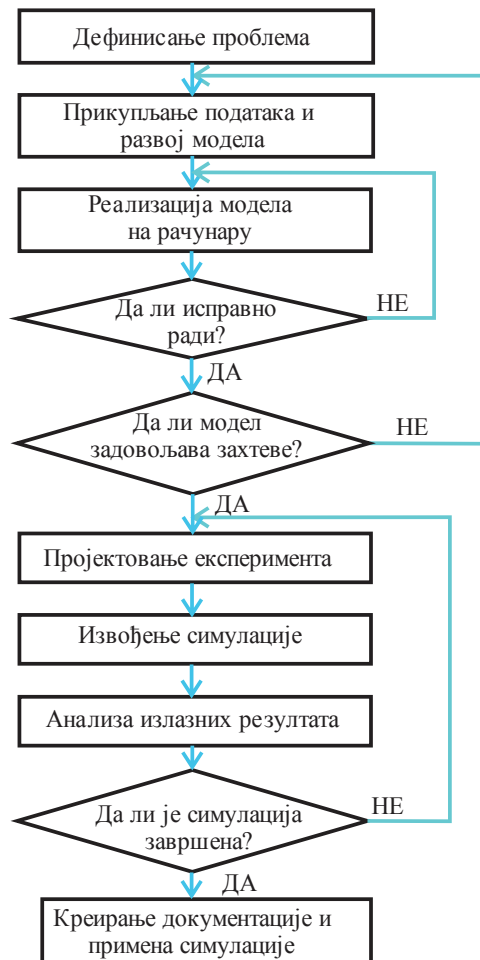
6. СИМУЛАЦИЈЕ

6.1 Увод

Симулација се користи у циљу повећања разумевања сложених система или поступака. Симулација представља имитацију неког система са циљем бољег разумевања или долажења до одређених закључака у вези система који се симулира [73, 74].

Симулација настаје нумеричким оцењивањем модела применом разних софтвера. Примењује се за предвиђање понашања система и врше се оптимизације. Моделовање и симулација имају значајну улогу при одлучивању у фази планирања и пројектовања.

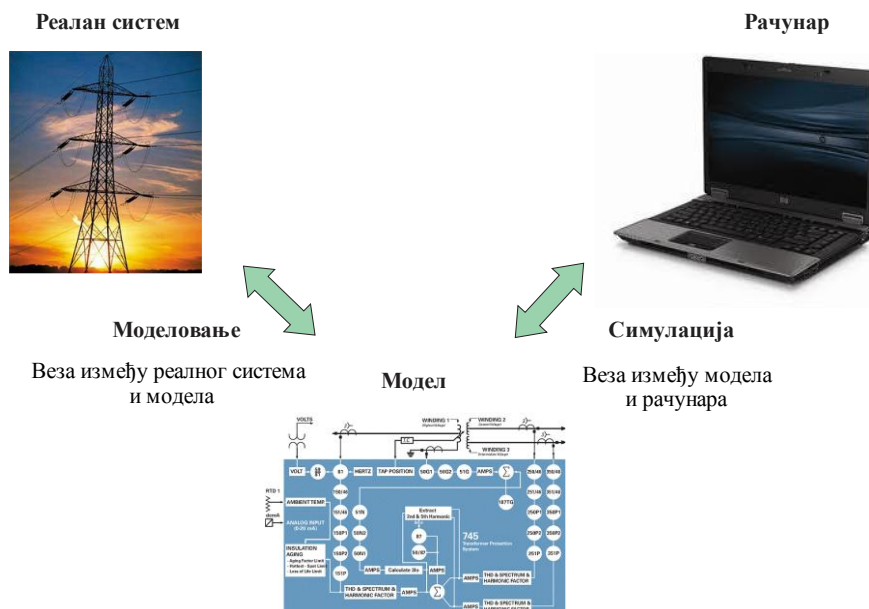
При развоју симулације потребно је извршити низ корака који су дати на слици 6.1. Прва фаза је дефинисање проблема који треба решити. Затим следи формирање модела који може бити представљен на различите начине. Модел је најчешће у облику математичких функција. Уколико је модел исправно формиран приступа се симулацији. Симулација може бити корисна при пројектовању и оптимизацији, као и за креирање виртуелних прототипова система. Примењује се за смањење ризика при креирању нових система или када се врше промене на постојећим системима.



Слика 6.1 Кораци у развоју симулације [77]

Симулирани подаци се даље анализују у зависности од потреба корисника.

Свака организација жели да буде сигурна да ће уложене инвестиције дати очекиване резултате. Зато је неопходно да се изврши прецизна анализа, па је симулација пожељна у таквим случајевима. Данас се симулације реализују применом рачунара и развојем одређених софтвера за симулацију (слика 6.2).



Слика 6.2 Формирање модела реалног система и симулација на рачунару [76]

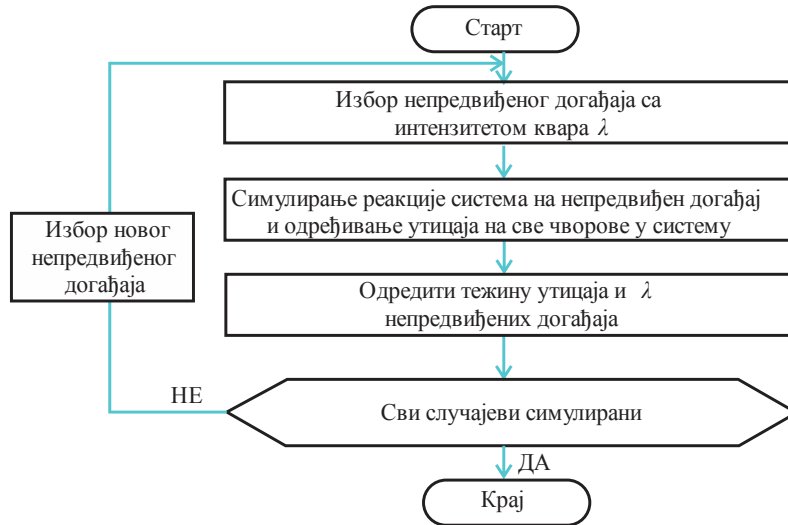
Користећи ове кораке врши се симулација система, а потом тестирање хипотеза о том систему. Морамо имати у виду да дефинисање симулације није прецизно као дефинисање модела. Дефинисање симулације зависи од [77]:

- метода за примену модела у времену,
- техника за тестирање, анализу или обуку, које се користе у реалном систему или где се креира модел реалног система,
- научног метода испитивања у вези експеримената са моделом, а не са делом стварности које модел представља,
- методологије за издвајање информација из модела посматрањем понашања модела при извршавању.

Приказ креираних модела зависи од развоја науке за визуелизацију и симулацију сложених система. Модели се могу користити да представе сложене системе који имају хаотично понашање, па се симулацијом формираног модела могу добити детаљнији подаци о посматраном систему.

6.2 Аналитичка симулација за техничке системе

Аналитичке симулације код техничких система имају за циљ прорачун утицаја стања (непредвиђених ситуација) на сваки елеменат у систему. На тај начин се одређује вероватноћа настанка неког догађаја којом се предвиђа годишња поузданост сваког елемента у систему. Аналитичка симулација се може описати у неколико корака датих у алгоритму са слике 6.3 [77].



Слика 6.3 Алгоритам извођења аналитичке симулације

Резултат симулације је очекивани годишњи број тренутних прекида, дужих прекида и број часова прекида за сваки елемент. На основу тога се може израчунати колико ће се пута активирати уређаји за заштиту и прекидачи. Аналитичка симулација је метода којом се прорачунава поузданост дистрибутивног система, трошкови одржавања опреме, итд. Овом методом се моделују карактеристике рада и могућност да се одреде мале промене на излазу при малим променама на улазним подацима система. Она се може применити како на радијалне, тако и на двострано напајане системе.

6.2.1 Приказ радијалне структуре у облику стабла

Радијални технички систем се дефинише као систем у коме сваки чвор има јединствену путању до извора напајања. Смер тока струје код радијалних система је од извора напајања према потрошачима. Неки системи су у облику радијалне топологије напајања, а други са могућношћу двостраног напајања.

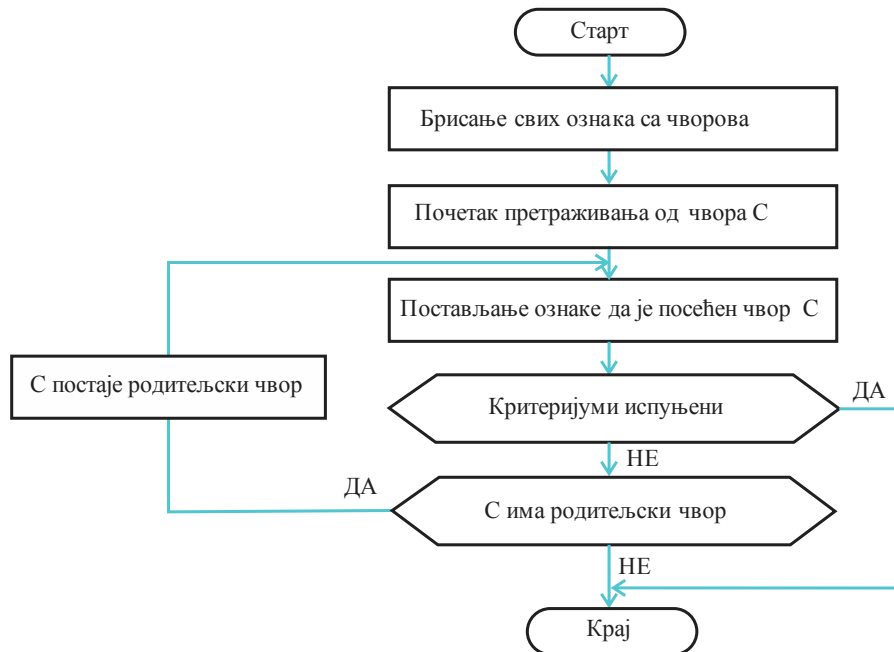
Претраживања која се користе код радијалних система могу бити одоздо на горе и одозго на горе (*upstream searches and downstream searches*). Претраживање одоздо на горе почиње од елемената стабла и креће се према извору напајања. Користе се при идентификовању извора напајања, уређаја за заштиту, тачке у којој настаје квар, као и за извођење многих других функција. Алгоритам за ову врсту претраживања је дат на слици 6.4.

Претраживање одоздо на горе има за циљ да прође кроз све чворове од најнижег нивоа до извора напајања или од неког чвора који задовољава унапред дефинисане критеријуме претраге. На пример, уколико је потребно пронаћи опрему за заштиту, овим алгоритмом претрага се завршава у оном тренутку када се пронађе први уређај за заштиту који је најближи насталом квару и налази се лево од места квара посматрано од извора напајања.

Претраживање одозго на доле почиње од извора напајања и пролази кроз низ чворова који су повезани за извор напајања, све док се не пронађе чвор који задовољава тражени критеријум. Овај начин претраживања је погодан при одређивању

групе потрошача који имају проблеме са испоруком електричне енергије, идентификовању прекида, итд. Код ове врсте претраживања се користе два основна алгорита за претраживање, и то [78]:

1. алгоритам за претраживање по ширини (*Breadth First Search - BFS*)
2. алгоритам за претраживање по дубини (*Depth First Search - DFS*).



Слика 6.4 Алгоритам за претраживање елемента методом одоздо на горе

BFS алгоритам заузима мање меморије, али је прорачун скупљи. *DFS* захтева већу меморију, али се извршава за краће време. Код *BFS* алгоритма прво се обилазе сви чворови који су на првом нижем нивоу од посматраног чвора, затим се идентификују сви чворови који су на другом нижем нивоу од посматраног чвора итд, све док се претрагом не обухвате сви чворови. Ова методологија је погодна када се траже чворови који се налазе близу почетног чвора (извора напајања), али ако се ради о великим системима, потребно је пуно времена за претрагу. Метода у програмском језику *Java* за *BFS* алгоритам је приказана на слици 6.5, са рекурзивним позивом и без рекурзивног позива.

DFS алгоритам прати елементе наследнике посматраног елемента по радијалној путањи и рекурзивно покреће нови *DFS* за све наследнике који нису обухваћени првобитном итерацијом. *DFS* је ефикаснији алгоритам, али захтева више меморије због рекурзивних позива функције за сваки део стабла. Метода у програмском језику *Java* за *DFS* алгоритам је приказана на слици 6.6, са рекурзивним позивом и без рекурзивног позива [78].

Резултат претраживања одозго на доле и одоздо на горе примењен на једноставну структуру у облику стабла приказан је на слици 6.7. Може се закључити да унија обе врсте претраживања не обухвата све чворове у стаблу. Разлог је што у претраживању одоздо на горе од чвора С су обухваћени чворови само једне гране која иде до извора напајања. Алгоритам за претраживање одозго на доле обухвата све елементе који су на нижем нивоу од посматраног елемента. Ова два алгоритма су основни алгоритми који се користе за симулацију нежељених догађаја.

```

public void bfs() {
    // BFS користи структуру података у облику реда
    Queue queue = new LinkedList();
    queue.add(this.rootNode);
    System.out.println(this.rootNode);
    visited.put(rootNode, true);
    while (!queue.isEmpty()) {
        Node node = (Node) queue.remove();
        Node child = null;
        while ((child = getUnvisitedChildNode(node)) != null) {
            visited.put(child, true);
            System.out.println(child);
            queue.add(child);
        }
    }
    clearNodes(); // Брисање посећених чворова
}

```

Примена рекурзивне функције:

```

public void bfsRecursive(Queue queue) {
    if (queue.isEmpty()) return;
    Node node = (Node) queue.remove();
    System.out.println(node);
    visited.put(node, true);
    for (Node child: node.child) {
        queue.add(child);
    }
    bfsRecursive(queue);
}

```

Слика 6.5 Изворни код *BFS* алгоритма за претраживање у програмском језику *Java* [78]

```

public void dfs() {
    // DFS користи се стек као структура података
    Stack stack = new Stack();
    stack.push(this.rootNode);
    visited.put(rootNode, true);
    System.out.println(rootNode);
    while (!stack.isEmpty()) {
        Node node = (Node) stack.peek();
        Node child = getUnvisitedChildNode(node);
        if (child != null) {
            visited.put(child, true);
            System.out.println(child);
            stack.push(child);
        } else {
            stack.pop();
        }
    }
    clearNodes();
}

```

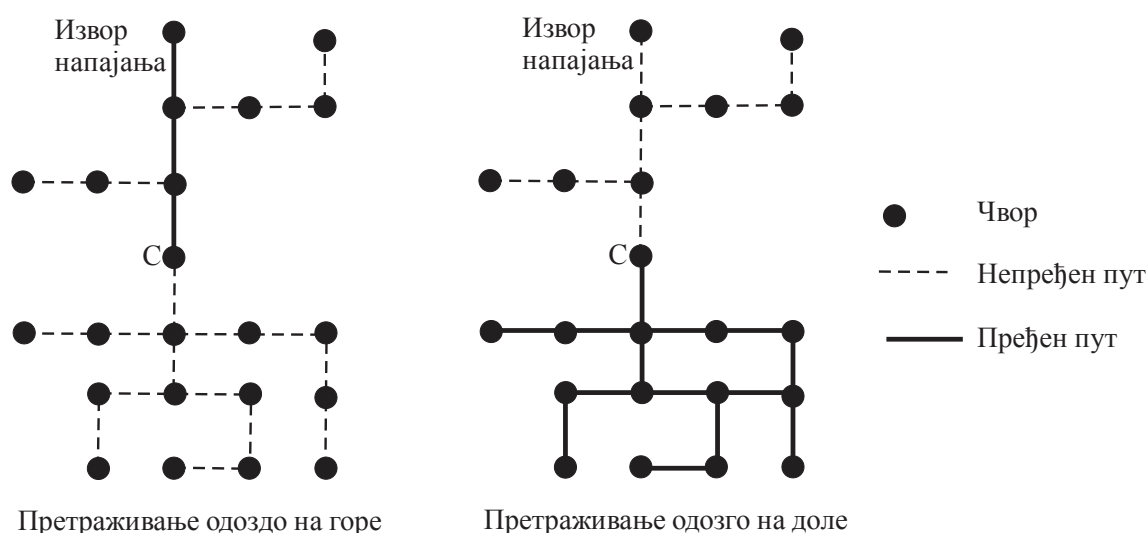
Примена рекурзивне функције:

```

public void dfsRecursive(Stack stack) {
    if (stack.empty()) return;
    Node node = (Node) stack.peek();
    if (visited.get(node)==null) System.out.println(node);
    visited.put(node, true);
    Node child = getUnvisitedChildNode(node);
    if (child != null) {
        stack.push(child);
    } else {
        stack.pop();
    }
    dfsRecursive(stack);
}

```

Слика 6.6 Изворни код *DFS* алгоритма за претраживање у програмском језику *Java* [78]



Слика 6.7 Упоредни преглед алгоритама за почетни елемент С

6.3 Симулација непредвиђених догађаја

Настанак кварова (непредвиђених догађаја) у техничком систему је праћен низом догађаја. Било који квар може различито утицати на потрошаче електричне енергије и на различите начине. Настанак неког квара доводи до моменталног прекида у испоруци електричне енергије и дужина прекида зависи од тога како ће место квара бити искључено и колико је времена потребно за отклањање квара. Наиме, квар може дуго да траје уколико је звездиште система изоловано или ако се не користи систем за аутоматско поновно укључење. Основа за развој аналитичке симулације је одређивање прецизног модела низа догађаја који настају након испада система и какав је утицај на различите потрошаче [79]. Општи приказ низа догађаја при настанку квара је дат у табели 6.1.

Табела 6.1 Аналитичка симулација низа догађаја након настанка квара

Редни број	Врста догађаја	Опис
1	Испад	Настанак квара у систему.
2	Поновно укључење	Уређај за поновно укључење се отвара како би се елиминисао квар. Ако је квар елиминисан уређај се искључује и систем враћа у нормалан рад.
3	Аутоматско прекидање	Аутоматски прекидачи када настане квар, покушавају да изолују квар отварањем реклосера.
4	Затварање (Lockout)	Ако квар и даље траје, надлежна заштита елиминише квар.
5	Аутоматско укључивање резервног напајања	После изоловања места квара аутоматским расклопним елементима се доводи напон исправном делу мреже (ово је случај тамо где је омогућено двострано напајање потрошача).
6	Ручно манипулисање	Ручним манипулацијама на лицу места се успоставља напајање потрошача који су због квара били искључени.
7	Поправка	Отклањање квара и враћање система у нормално радно стање.

6.3.1 Симулација заштите система помоћу расклопне опреме

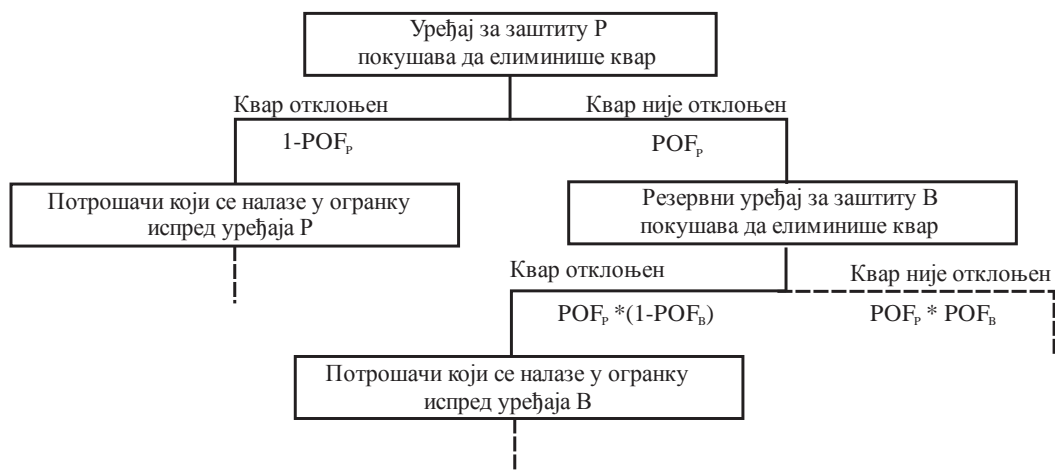
Да би се због настанка квара минимизовао број искључених потрошача, неопходна је уградња расклопне опреме на појединим деловима дистрибутивног система. Расклопна опрема може бити аутоматска (прекидачи, раставне склопке, уклопке (рекросери) и одвајачи (секционализатори)) или са ручним покретањем (растављачи стандардне конструкције) [79].

Претпоставља се да сви расклопни елементи у свим фазама исправни. Уколико се деси квар на било којој фази, расклопни елементи треба да утврде на којој се фази десио квар и да искључе само ту фазу. Уколико то није могуће из техничких разлога, онда се прекидају све три фазе.

Колико расклопних елемената и које врсте треба поставити на деоницама је веома сложен задатак и зависи од категорије потрошача. Ово је оптимизациони проблем у коме се решење тражи методом претраживања. Да би поузданост била што већа, а трошкови уградње расклопне опреме нижи, неопходно је извршити оптимизацију уградње расклопних уређаја [79].

6.3.2 Симулација кварова на заштитним елементима

Секвенцијална аналитичка симулација догађаја постаје веома сложена у случају анализе кварова на заштитним уређајима. Ови кварови се констатују када елемент треба да реагује због постојања квара у систему, али затаји. Вероватноћа таквог догађаја се назива вероватноћа погонских кварова и обележава се са *POF* (*Probability of Operational Failure*). Ови кварови су разлог да се секвенцијална симулација дели на две путање. На једној путањи се претпоставља да је на елементу дошло до квара и да је вероватноћа тог догађаја *POF*, а на другој да тај елемент ради са вероватноћом $1-POF$. Ова подела је илустрована на слици 6.8, где се разматра високонапонски осигурач који треба да реагује због елиминације квара.

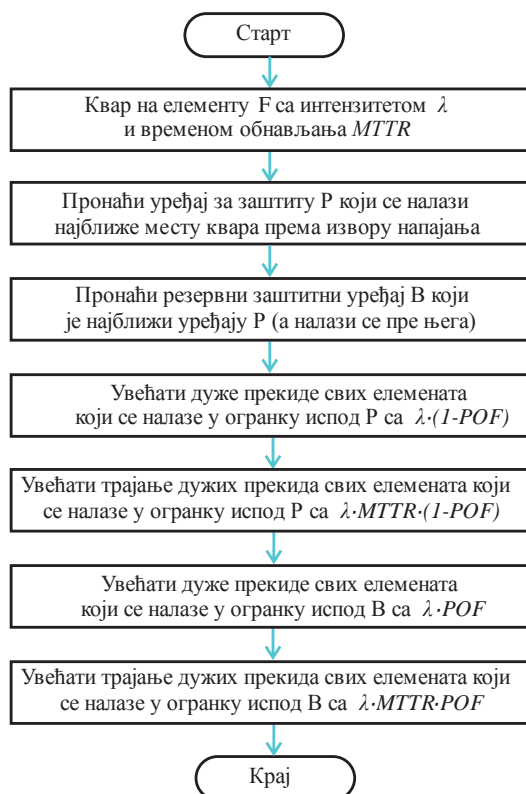


Слика 6.8 Пример симулације елиминисање квара у току рада

Резултат дељења симулације је нумеричко разматрање свих могућих одзива система на сваки могући догађај (у контексту кварова на заштитним елементима). Ово разматрање је важно пошто су нека стања веома ретка, али могу имати велики утицај

на систем када се у њих уђе. Такође, на овај начин је омогућено да се утврди да ли су после отклоњеног квара сви потрошачи враћени на систем, односно да ли је свима успостављено напајање.

Кварови на заштитним елементима се могу моделовати проширењем претходно изложених алгоритама. Алгоритам је приказан на слици 6.9.



Слика 6.9 Алгоритам симулације система заштите од настанка квара са резервним уређајем за заштиту

Алгоритмом са слике 6.9 се претпоставља да резервни систем за заштиту 100% отклања квар. Квар резервног система заштите се може моделовати рекурзивним позивом алгоритма за сваки квар који настане у систему. На пример, ако је вероватноћа квара примарног система заштите $POF_p = 10\%$, а резервног система заштите $POF_r = 20\%$, примарни систем ће реаговати у 90% случајева, док ће резервни систем исправно реаговати са вероватноћом од $0,1 \cdot (1 - 0,2) = 0,08 = 8\%$.

Моделовање квара заштитних елемената је сложеније када се користе аутоматски расклопни елементи. Наиме, ако посматрани елемент нема резервну заштиту, изведену преко суседног расклопног елемента, сви привремени кварови који се догоде неће имати могућност да се отклоне сами од себе, већ ће доћи до прекида у напајању потрошача [78].

6.4 Monte Carlo симулација

Monte Carlo симулација се заснива на статистичкој обради низа случајно генерисаних могућих стања или процеса. Ова симулација захтева пуно рачунарског

времена за разлику од аналитичких метода, јер обухвата све аспекте неповољних догађаја посматраног система. Ако се изврше две симулације са истим улазним параметрима, излазни подаци неће бити исти. Са понављањем симулације резултати ће бити слични аналитички добијеним резултатима. У табели 6.2 је дат упоредни преглед предности и недостатака аналитичке методе и Monte Carlo симулације [82].

Ова метода се може применити и за оцену поузданости система при чему се анализује понашање система у одређеном временском периоду (обично једна година). Уколико се изврши N симулација, резултат се добија као средња вредност свих симулација [81]:

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \quad (6.1)$$

где је:

\bar{x} - очекивана вредност

x_i - резултат поједине симулације

N - број симулација.

Табела 6.2 Упоредни преглед неких предности и недостатака аналитичких и Monte Carlo симулација

Симулационе методе		
	Аналитичка	Monte Carlo
Предности	Добија се тачан резултат за дефинисан модел.	Добија се велики број резултата, па се израчунава средња вредност.
	Резултати симулација се добијају једноставно када је развијен одговарајући модел.	Случајно су генерисане променљиве и зависе од изабране расподеле вероватноћа за задати модел.
	Не мора се имплементирати на рачунару. Довољна је анализа и на папиру.	Једноставна је за примену и може се користити у било којој научној области.
Недостаци	Потребно је извршити одговарајуће претпоставке (поједностављења) да би проблем био прилагодљив	За симулацију је неопходан рачунар.
	Мање је флексибилна симулација. Могу постојати одређена ограничења при развоју модела.	Прорачуни могу трајати много дуже од аналитичких модела.
	Модел могу разумети само експерти који добро познају математичке проблеме.	Резултати могу бити непрецизни и зависе од броја понављања.

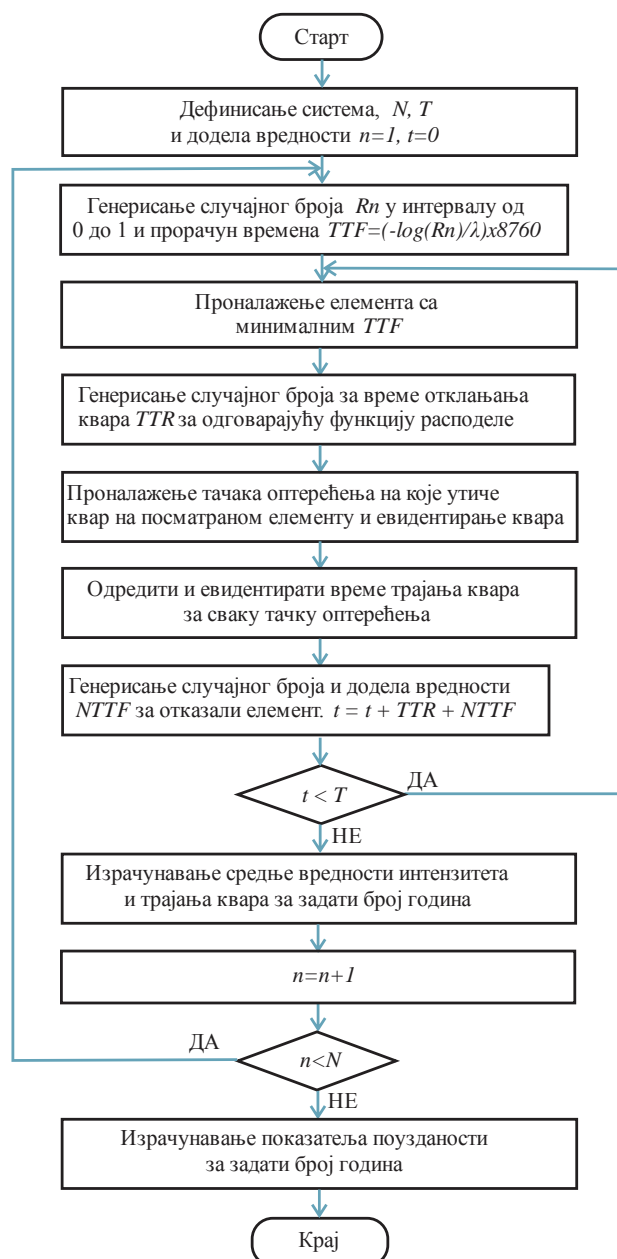
Број симулација зависи од резултата који се добијају, при чему се тежи да се добије стабилна вредност. Ако се симулира догађај који се ретко дешава, нпр. ако неки елемент отказује једном у 100 година, потребно је извршити 1000 симулација да би се добио прецизан резултат.

Monte Carlo симулације се могу поделити на два основна типа:

1. секвенцијалне симулације,
2. симулације случајних стања.

Секвенцијална симулација се користи за одређивање образаца понашања система у симулираном времену и за предвиђање очекиваних вредности показатеља поузданости. На основу података који се добијају из база података о показатељима поузданости, могу се за дата времена у раду и отказу одређених елемената генерисати случајне вредности. На основу њих се могу добити расподеле вероватноћа о кваровима елемената и времену обнављања.

Алгоритам за одређивање показатеља поузданости код техничких система применом симулације је дат на слици 6.10.



Слика 6.10 Алгоритам за одређивање показатеља поузданости применом симулације [82]

Скраћенице дате у алгоритму су:

TTF - *Time To Failure* (време трајања исправног рада)

TTR - *Time To Repair* (време трајања отклањања кvara)

NTTF - *New Time To Failure* (ново генерисано време трајања исправног рада)

6.4.1 Генерисање случајних бројева

Генерисање случајних бројева је основа за све Monte Carlo симулације. Генератор случајних бројева мора бити валидан како би се добијали добри резултати, јер уколико се генеришу исте вредности за неку расподелу, резултати симулације неће бити одговарајући. Најчешће коришћен генератор случајних бројева је онај којим се генеришу вредности од нула до један. У већини програмских језика се користи генератор случајних бројева који се састоји од три параметра и генерише нови број на основу претходно генерисаног броја. Формула која се користи код генератора случајних бројева је [83]:

$$x_{i+1} = [A \cdot x_i + C] \bmod B \quad (6.2)$$

$$r_i = \frac{x_i}{B} \text{ је случајан број } 0 \leq r_i < 1 \quad (6.3)$$

где је:

A - мултипликатор - множилац (позитиван цео број)

B - модуо (остатак дељења два броја - природан цео број)

C - прираштај (позитиван цео број)

x_0 - почетна вредност (позитиван цео број)

Случајни бројеви који се генеришу према овом обрасцу, могу се понављати као шаблон. Ако је модуо мањи од броја захтевних генерисаних бројева, понављање шаблона је неминовно. Корисник мора водити рачуна да због овог понављања не буде угрожена тачност прорачуна.

Ако се користи иста почетна вредност, формираће се исти низ случајних бројева. На овај начин се добијају поновљиви резултати и требало би их избегавати. Када се користи више микропроцесора (нпр. при паралелном или дистрибуираном програмирању), треба водити рачуна о почетној генерисаној вредности. Да се не би добијали бескорисни резултати, најбоље је користити различите микропроцесоре, како се не би деградирале перформансе алгоритма.

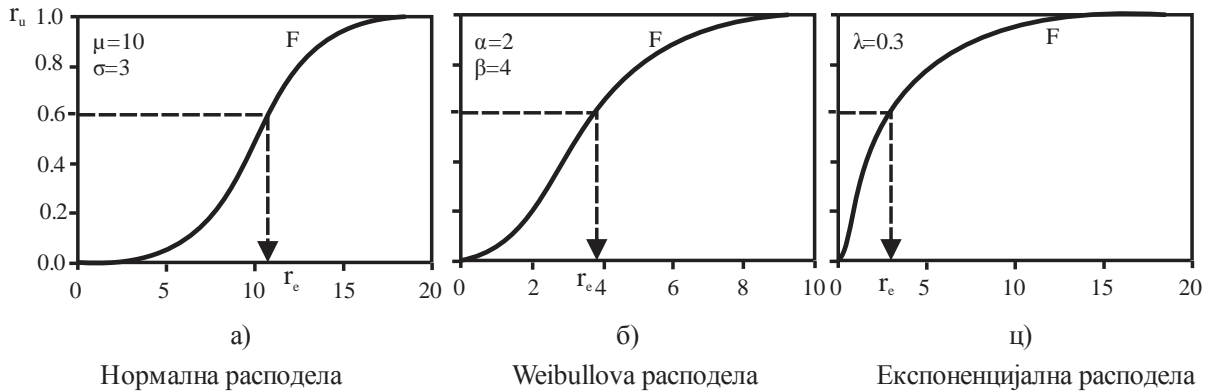
У зависности од типа функција примењују се инверзне трансформације, да би се добили одговарајући случајни бројеви. Изглед добијеног графика зависиће од расподеле, а вредности се крећу између нула и један (слика 6.11). Ту је приказан пример три расподеле, где је означен случајно генерисан број 0,6 који одговара одређеним параметрима нормалне, Weibull-ове и експоненцијалне расподеле.

Ради илустрације добијања случајних бројева, размотрићемо ситуацију када су пожељни случајни бројеви са експоненцијалном расподелом. У овом случају, случајна променљива r_u са униформном расподелом мора се изједначити са случајном променљивом r_e која подлеже експоненцијалној расподели

$$r_u = 1 - \exp(-\lambda \cdot r_e). \quad (6.4)$$

Из једначине (6.4) добија се:

$$r_e = -\frac{\ln(1-r_u)}{\lambda} \quad (6.5)$$



Слика 6.11 Случајно генерисани бројеви за различите расподеле

Израз (6.3) може се употребити ради верификације графичког решења које је показано на слици 6.11. Ако је $r_u=0,6$ и $\lambda=0,3$ тада је $r_e = 3,0543$. Овај резултат одговара вредности са графика на слици 6.11 ц) и може се применити и на друге расподеле.

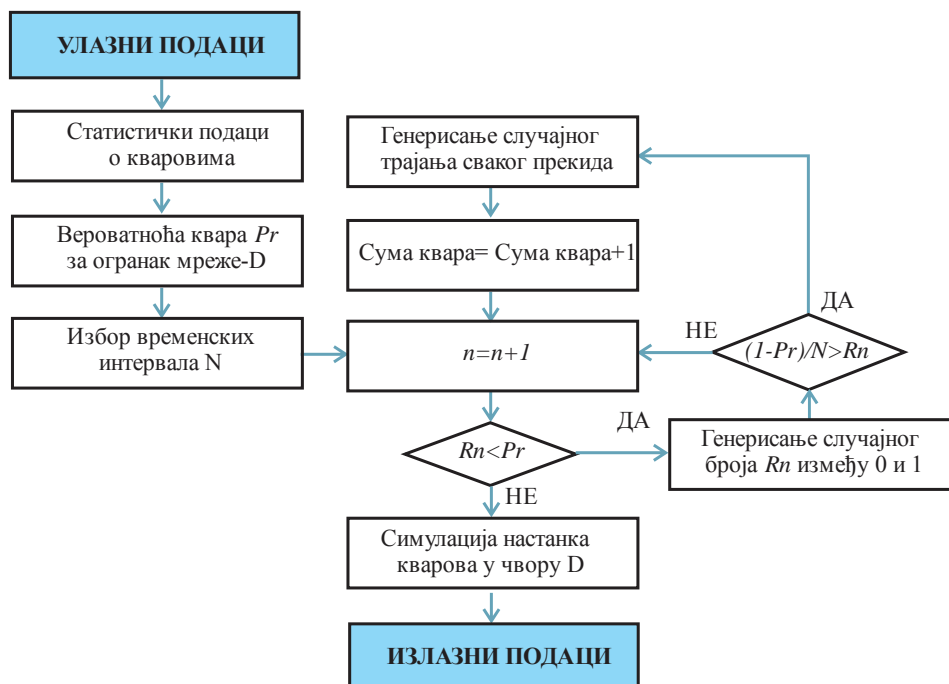
6.4.2 Секвенцијална Monte Carlo симулација

Секвенцијална Monte Carlo симулација има за циљ да прецизно моделује понашање реалних система, као низ случајних догађаја који се догађају независно један од другог у времену. Неки догађаји у систему се моделују расподелама вероватноћа и могу се догађати случајно у било ком тренутку симулације. Остали догађаји су условни, јер вероватноћа њиховог догађања зависи од претходних догађаја и тренутног стања система (на пример, узастопни кварови). На сличан начин, одзив система на нежељене догађаје се моделује пробабилистички, дозвољавајући на тај начин могућност да систем реагује на много различитих начина. Ако се примени са довољно детаљних података, секвенцијална Monte Carlo симулација даје високо реалан модел који је упоредив са физичким експериментом. При овој симулацији, период симулације се дели на мале временске интервале и сваки део се симулира у низу и идентификују се нови кварови. Прецизност симулације расте уколико се временски интервали смањују, али се повећава укупно време трајања симулације.

Ако се моделује време од једне године, са временским интервалима од сат времена, потребно је поделити годину на 8760 временских интервала. Аналогно, при креирању модела чије су дужине интервала од једног минута, број интервала ће бити 525600. Ефикасност рачунарске симулације може се побољшати применом променљивих временских интервала, где се при нормалном раду узимају дужи временски интервали, а уколико дође до нежељених ситуација, узимају се краћи временски интервали.

Применом ове симулације формира се низ симулација за посматрани период од једне године који се дели на што краће временске интервале. Алгоритам на слици 6.12 [84] се користи при генерисању кварова за сваки део *ЕЕС* у посматраном временском

периоду. Процес симулације ће бити завршен када се за сваки посматран временски интервал одреди вероватноћа настанка кварова.



Слика 6.12 Алгоритам за симулацију настанка квара [84]

Вероватноћа настанка нежељеног догађаја у неком временском интервалу је једнака вероватноћи настанка догађаја на крају временског интервала умањена за вероватноћу настанка догађаја на почетку временског интервала. Та вероватноћа је приближно једнака вредности функције интензитета отказа на почетку временског интервала која је помножена са трајањем временског интервала [85]:

$$P(t) = F(t + \Delta t) - F(t), \quad (6.6)$$

$$P(t) \approx f(t) \cdot \Delta t, \quad (6.7)$$

где су:

$P(t)$ - вероватноћа настанка догађаја у временском интервалу $[t, t + \Delta t]$,

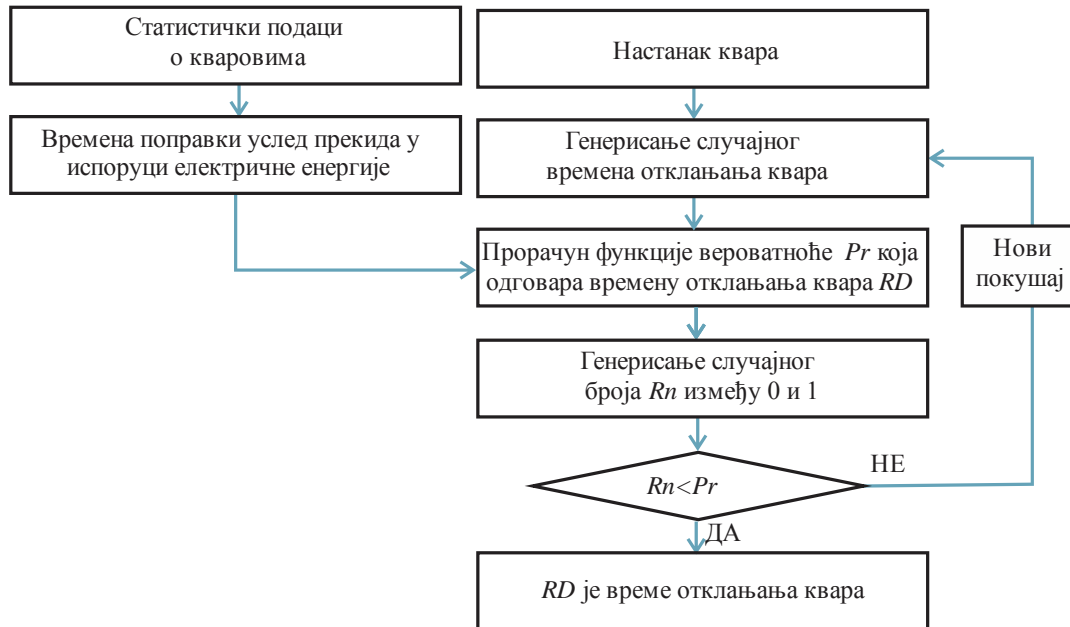
$F(t)$ - функција расподеле вероватноћа,

$f(t)$ - функција густине вероватноће,

Δt - трајање временског интервала.

Код неких расподела, као на пример код експоненцијалне, интензитет настанка кварова не мења се у времену, тј. константан је. Код система који се моделују овим расподелама, вероватноћа настанка квара је независна од дужине трајања експлоатације. Код осталих расподела, вероватноћа интензитета отказа је променљива у времену и мора се рачунати посебно за сваки временски интервал од интереса. Као што је већ речено, експоненцијалном расподелом се добро моделују они догађаји који се могу приписати спољашњим утицајима (на пример, откази због директног атмосферског пражњења). Свим осталим расподелама могу се моделовати догађаји који су последица скривених конструктивних грешака, старости, степена оптерећења елемента, променљивости оптерећења и др.

На слици 6.13 [84] приказан је алгоритам симулације времена отклањања сваког квара у неком задатом чвору D. Укупно трајање прекида се израчунава понављањем симулација за нпр. временски интервал од једне године, тако да се добијају статистички подаци за даљу анализу.



Слика 6.13 Алгоритам за симулацију времена отклањања квара [84]

Примена секвенцијалне Monte Carlo симулације је погодна када понашање система зависи од претходних догађаја. Као добар пример могу се разматрати временске непогоде које узрокују настанак кварова на систему. Тада испад једног дела или елемента може да доведе до испада и других елемената који нису директно погођени (тзв. каскадно ширење кварова).

6.4.3 Monte Carlo симулација случајних стања

Секвенцијална Monte Carlo симулација се не користи уколико нежељени догађаји нису зависни и понашање система не зависи од претходних догађаја. Уколико није битан редослед настанка нежељених догађаја, онда се примењује Monte Carlo симулација случајних стања. Код ове врсте симулације скраћује се период симулирања и правила су једноставнија, јер су догађаји независни. Симулација почиње са скупом могућих нежељених догађаја и генерисањем случајног броја који представља вероватни број непредвиђених догађаја у периоду симулације.

Пошто је уобичајен период симулације од годину дана за оцену поузданости, већина непредвиђених догађаја се неће десити или ће се десити само једном. Прецизан број настанка непредвиђених догађаја зависи од расподеле вероватноће која је примењена у моделу. На пример, за експоненцијалну расподелу кварова (која има константан интензитет отказа), вероватноћа да ће елемент отказати x пута током једне године је [86]:

$$P_x = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}. \quad (6.8)$$

Да би се одредило колико пута годишње ће елемент да откаже, генерише се случајан број у интервалу $[0, 1]$. Ако је овај број мањи од $e^{-\lambda}$, неће се десити квар у симулираној години. Ако је случајни број између $e^{-\lambda}$ и $\lambda e^{-\lambda}$, десиће се један квар. Ако је случајан број већи од $\lambda e^{-\lambda}$ десиће се више кварова у симулираној години. Примера ради, посматрајмо елемент чији је очекивани интензитет кварова $\lambda = 0,1 [1/\text{god}]$. Вероватноће појединих догађаја у току анализираних година су [85]:

- вероватноћа да неће доћи до настанка квара 0,9048
- вероватноћа да ће настати један квар 0,0905
- вероватноћа да ће настати два квара 0,0045
- вероватноћа да ће настати три квара 0,0002.

6.5 Утицај амбијенталних услова на поузданост електричне опреме

Аналитичке методе којима се предвиђа поузданост дистрибутивних (техничких) система типично се базирају на претпоставци да су сви кварови међусобно искључиви (независни). Ово је практично тачно у условима нормалних временских прилика и апсолутно погрешно за екстремне временске услове. Главна тешкоћа је већ поменута чињеница да током атмосферских пражњења долази до појаве вишеструких једновремених кварова. Тада највероватније неће бити на располагању потребан број екипа, што ће као последицу имати дуго трајање прекида напајања појединих потрошача [87].

У наставку је описано како се поузданост дистрибутивног система током атмосферских пражњења моделује применом секвенцијалне симулације. Временске непогоде се моделују као лоша стања, која се одликују низом функција расподеле вероватноћа и које зависе од интензитета атмосферских пражњења. Параметри који дефинишу пражњење су изокераунички ниво, трајања пражњења и амплитуда [87].

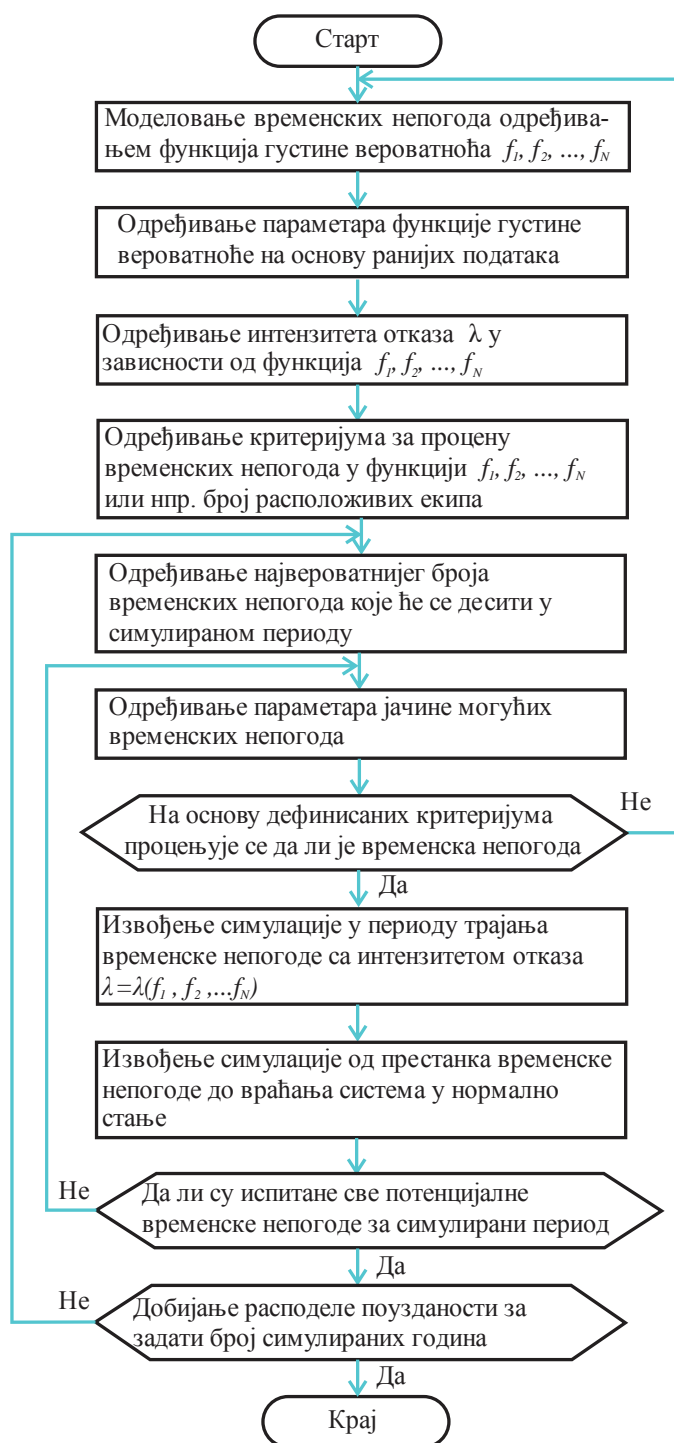
6.5.1 Симулација временских непогода

Симулација временских непогода врши се кроз две фазе. У првој фази симулације симулира се период неповољних временских прилика, а у другој се симулирају поправке и одржавања која се спроводе када престану временске непогоде. У току прве фазе симулације временских непогода расте вероватноћа настанка кварова на електроенергетској опреми. Најкритичнији аспект при симулацији утицаја временских непогода је моделовање утицаја временских непогода на интензитет кварова. Уколико постоји велика количина података из претходног периода у вези са настанком временских непогода, може се одредити зависност између интензитета временских непогода и кварова на опреми. Модел интензитета кварова може се извести из физичких модела. При креирању модела за симулацију, сваки елемент се тестира на настанак квара у било ком временском интервалу [86].

Да би се постигли одговарајући резултати, процена временских непогода и симулација морају се понављати више пута. Потом се одређује утицај временских непогода на укупну поузданост, симулацијом у дужем временском периоду. Процена временских непогода може се одредити користећи алгоритам са слике 6.14 [87, 88].

Овај алгоритам може се применити при моделовању и симулацији олује. Да би се одредио утицај олуја на поузданост, неопходне су информације о два параметра:

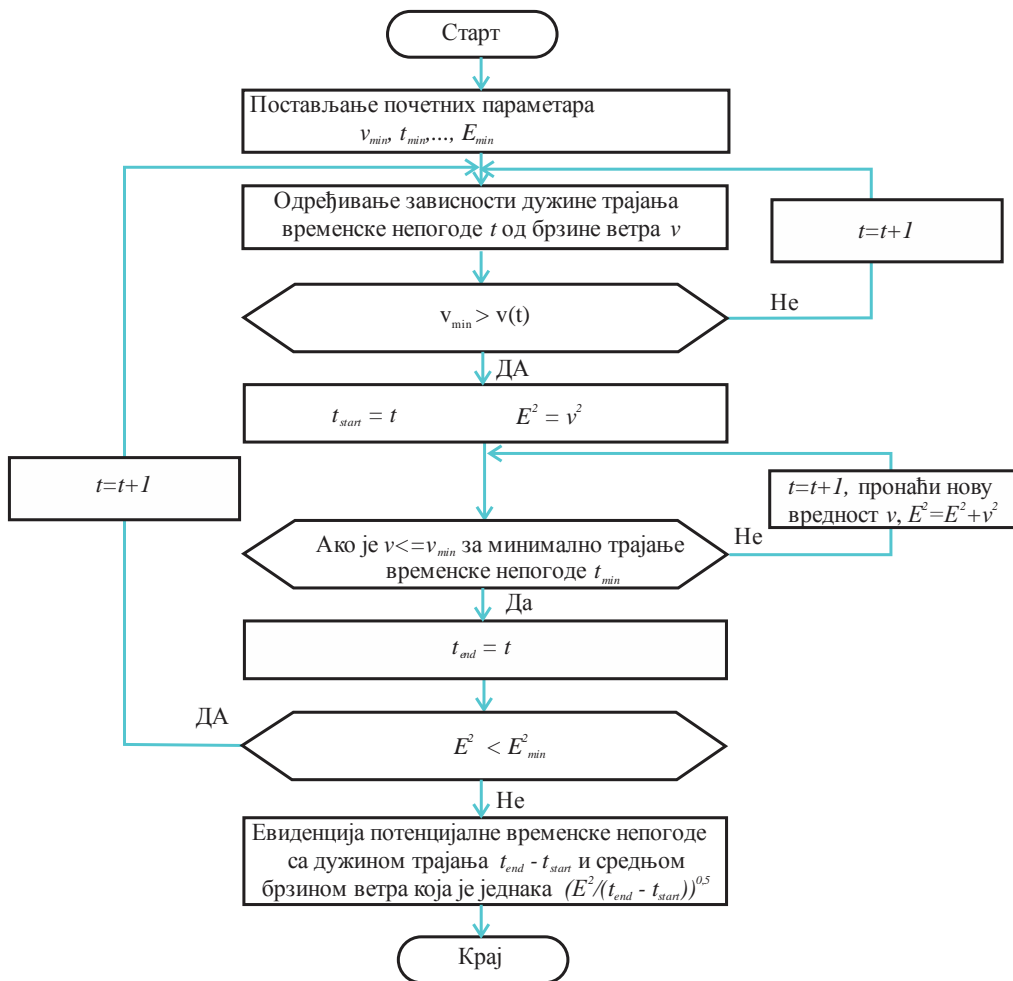
брзини ветра и о трајању олује. Да би се ове вредности одредиле, потребно је да постоје подаци о претходним временским непогодама, како би се извршила анализа и моделовање. Као почетни параметри узимају се просечна брзина ветра и минимално трајање непогода. Крајњи критеријум је да брзина ветра буде испод специфициране брзине за минимално трајање непогода. Алгоритам за идентификовање потенцијалних временских непогода дат је на слици 6.15 [89].



Слика 6.14 Алгоритам за симулацију временских непогода

Да би се анализирале временске непогоде потребни су следећи параметри:

- v - средња брзина ветра при временским непогодама,
 t_{start} - време почетка непогоде,
 t_{end} - време завршетка непогоде,
 v_{min} - минимална брзина ветра,
 t - дужина трајања временских непогода у часовима,
 t_{min} - минимална дужина трајања временских непогода у часовима,
 E - енергија ветра
 E_{min} - минимална енергија ветра.



Слика 6.15 Алгоритам за одређивање могућих временских непогода

Услед настанка временских непогода, потребно је одредити функцију густине вероватноће трајања олује и брзине ветра. Обично се користи лог - нормална расподела. Функција густине вероватноће за трајање потенцијалних временских непогода f_t и функција густине вероватноће брзине ветра f_v су:

$$f_t(t - t_{min}) = \frac{1}{\sigma_t(t - t_{min})\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(t - t_{min}) - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right] \quad (6.9)$$

$$f_v(v - v_{min}) = \frac{1}{\sigma_v(v - v_{min})\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(v - v_{min}) - \mu_v)^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (6.10)$$

где су: μ_d , σ_d , μ_v и σ_v - лог - нормални параметри који се добијају користећи податке из претходног периода о временским непогодама [89].

При већим брзинама ветра повећава се интензитет отказа, па се кварови који настају моделују у функцији брзине ветра (нису константне вредности). Кварови који се односе на надземне водове углавном су последица ломљења грана дрвећа или падања стубова услед временских непогода, па је та величина пропорционална квадрату брзине ветра. Интензитет кварова услед временских непогода за надземне водове при брзини ветра v добија се као:

$$\lambda(s) = \lambda_{base} \left(\frac{v}{v_{base}}\right)^2, \quad (6.11)$$

где су:

λ_{base} - базни интензитет кварова,

v_{base} - базна брзина ветра.

Податак о интензитету кварова надземних водова који настају због ветра се веома тешко добија, јер се у погонској статистици не врши посебно евидентирање оваквих кварова. Ова вредност се одређује постављањем брзине ветра на двоструку вредност средње прорачунате брзине; затим се врше подешавања интензитета кварова и упоређивање са ранијим подацима. Укупан очекивани број кварова N_k у систему одређује се сабирањем броја кварова свих елемената у систему [84, 90]:

$$N_k = t \cdot \left(\frac{v}{v_{base}}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (6.12)$$

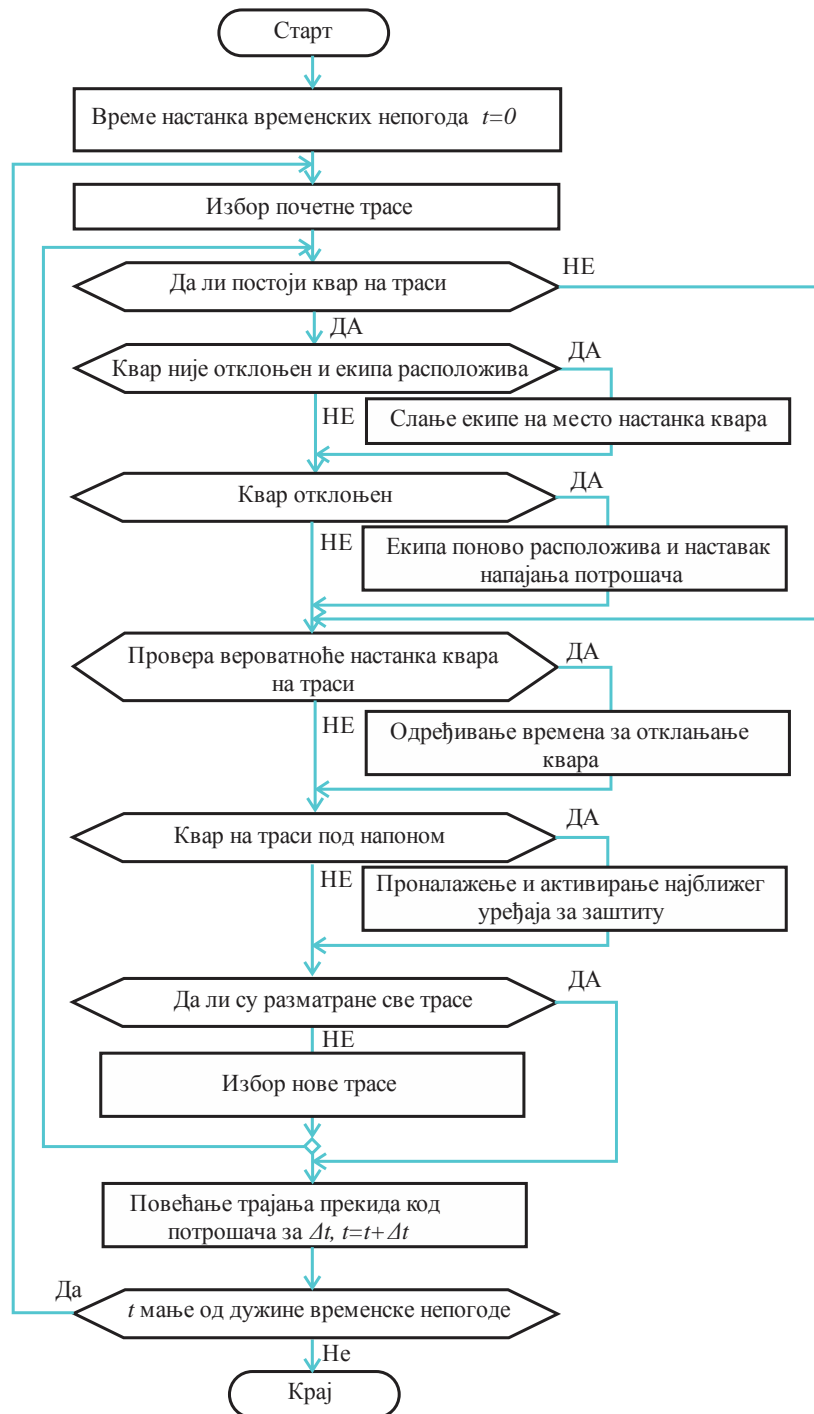
где је: n - број водова у систему.

За сваку деоницу вода дефинише се или је познато средње време трајања поправке (*Mean Time To Repair* - *MTTR*), па је укупно очекивано време поправке једнако производу *MTTR* сваког вода и очекиваном броју кварова на том воду. Укупно очекивано време отклањања кварова T_k у току олује се одређује сумирањем времена отклањања кварова на свим водовима у систему:

$$T_k = t \cdot \left(\frac{v}{v_{base}}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n [MTTR \cdot \lambda_i] \quad (6.13)$$

Да би се симулирале временске непогоде у некој години, потребно је пратити следеће кораке. Прво се генерише број потенцијалних временских непогода које су једнак просечном броју непогода из претходног временског периода. Сваки догађај има одређено време трајања и брзина ветра је одређена применом функције густине вероватноће која одговара раније прикупљеним подацима. У другом кораку утврђује се да ли потенцијална временска непогода задовољава критеријум који је дефинисан за временске непогоде. Ако су задати критеријуми задовољени, проглашава се временска непогода. При симулацији система одређује се утицај настанка временске непогоде на било ког потрошача у току посматране године.

Свака временска непогода се мора детаљно анализирати како би се одредила поузданост напајања сваког потрошача у току временске непогоде. То се постиже применом симулације која се састоји од две фазе (слике 6.16 и 6.17). У првој фази симулација креће са настанком временске непогоде и завршава се са престанком временске непогоде. У случају настанка квара, екипе за отклањање кварова морају бити спремне да крену на терен, а у случају непримећеног оштећења опреме могу се јавити проблеми сигурности у току поновног успостављања напајања. Алгоритам за прву фазу симулације приказан је на слици 6.16 [91].



Слика 6.16 Алгоритам прве фазе симулације олујне временске непогоде

Прва фаза симулације почиње при нормалном раду система. Потом се проверава да ли је дошло до квара у току првог временског интервала. Ако се десио квар и екипа је расположива, онда се шаље на место где се квар десио. Ако су све екипе на терену, било која екипа која постане расположива биће послата на место где је настао квар, при чему се отклањају прво кварови који су критичнији за већи број потрошача. Поступак се наставља све док не престане лоше време и онда почиње друга фаза.

Друга фаза симулације разматра врсту квара и успостављање напајања потрошача. При том, претпоставља се да неће доћи до настанка додатних кварова на систему. У овој фази на систему могу бити неотклоњени кварови који нису елиминисани у првој фази (екипе су послате на место настанка квара, осигурачи су прегорели, прекидачи су отворени, итд.). Први задатак је да се провери да ли се може успоставити напајање у предвиђеном временском периоду. Уколико је то немогуће, за неке потрошаче се морају пронаћи алтернативни извори напајања. Симулација се изводи као и код прве фазе, само што у овој фази не долази до настанка нових кварова на систему и екипа за отклањање кварова успоставља напајање што врећем броју потрошача. Друга фаза симулације траје све док се не елиминишу сви настали кварови и свим потрошачима се успостави напајање. Друга фаза симулације је приказана алгоритмом на слици 6.17 [91].

Трајања прекида у испоруци електричне енергије потрошачима варирају из године у годину. На основу података прикупљених претходних година, могуће је утврдити колико ће приближно бити време трајања прекида за наредни временски период. Тако, на пример, прекиди који настају у току нормалног рада дистрибутивног система су у просеку око 3,8 часова годишње. Међутим, услед временских непогода годишњи прекиди су већи него у нормалним условима рада.

6.5 Постојеће методе за динамичко моделовање и симулацију система

Симулациони модел се може дефинисати као приказ система применом математичких, логичких и симболичких веза између елемената система. Може се дефинисати и као скуп правила (једначина, дијаграма токова, стања, итд) којима се дефинише понашање система у задатом временском интервалу. На основу ове две дефиниције се може закључити да се симулациони модел састоји од математичког модела који је компјутеризован да би обезбедио боље разумевање испитиваног система [92].

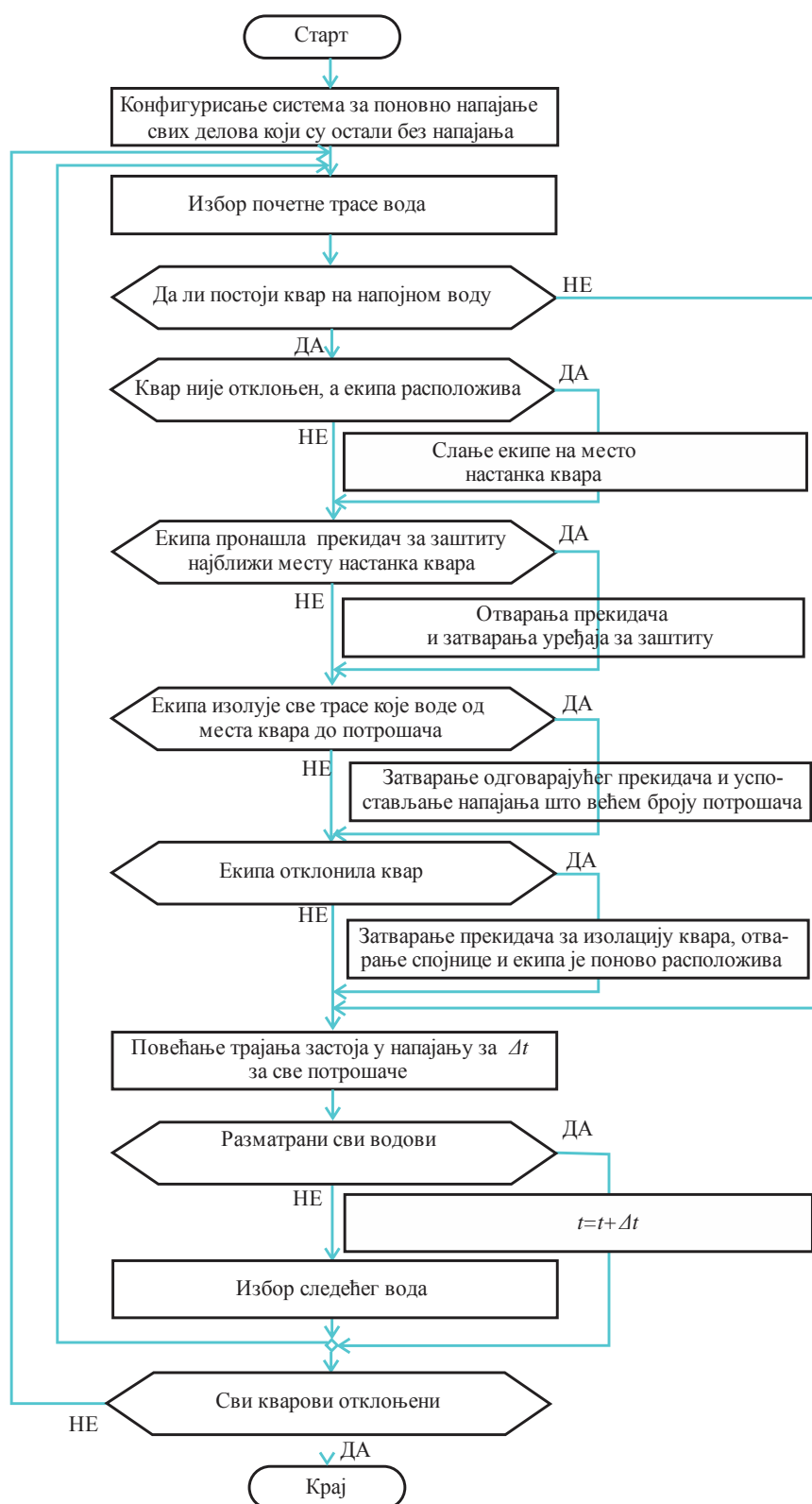
Најчешће коришћене методе симулације су:

- Симулација дискретних догађаја (*Discrete Event Simulation - DES*),
- Симулација базирана на агентима (*Agent Based Simulation - ABS*),
- Симулација динамичких система (*System Dynamic Simulation - SDS*)

Овде ће укратко бити објашњене прве две методе, а детаљније трећа која ће бити примењена за потребе моделовања и симулације трошкова активности одржавања електричне опреме.

DES је метода за динамичко моделовање и симулацију која је настала педесетих година. Као улазне величине при моделовању користе се случајне вредности, па се систем анализује у дискретним временским интервалима. Код ове методе је значајно што се врши организовање елемената у класе или низове података. За моделовање система применом *DES* се користе дијаграми токова. Примењује се код: производних система, услужних система, банкарских система, транспортних система, у војној индустрији, образовању, здравству, итд. За симулацију се могу користити софтверски пакети као што су: *ARENA*, *AutoMOD*, *Extend*, *ProModel*, *Witness*, *Quest*, *Simul8* и

AnyLogic. Са дијаграмом тока се формирају интеракције између ентитета као што су, на пример: процеси, доношење одлука, чекања и кашњења. Предност ове методе је што се може комбиновати са другим симулационим методама и што се систем моделује као низ прецизно дефинисаних догађаја [93].



Слика 6.17 Алгоритам друге фазе симулације олујне временске непогоде

Као пример ове методе симулације може се разматрати кретање авиона. Док авион лети, промене кретања авиона су непрекидне у времену, а авион слеће на аеродром у дискретном (случајном) временском интервалу. Симулацијом се утврђује колико је времена потребно да би прелетео задати пут, колико је времена потребно за слетање авиона, за излазак путника из авиона или улазак у авион и други низ догађаја који се дешавају у току лета авиона. Могу анализирати нпр. временске прилике које могу успорити кретање авиона.

Ова метода симулације се примењује често у случајевима кад су велике финансијске инвестиције за неки пројекат, као на пример симулација сложених производних система. Уколико фирма планира да формира нову производну линију, требало би симулирати да ли је економски исплатива та инвестиција и да ли је практична за примену. Симулацијом се утврђује да ли је исплативо улагање, без извођења реалног експеримента. У неким ситуацијама *DES* је немогуће применити, као на пример у случајевима предвиђања понашања људи.

ABS метода је настала почетком двадесет првог века применом на пословним проблемима. Метода се заснива на вештачкој интелигенцији коришћењем мулти-агентних система и роботике. Мулти-агентни системи се састоје од већег броја агената (ентитет који има дефинисана правила понашања и може бити јединка или група) између којих постоји дефинисана интеракција, где се унапред одређују правила понашања и агенти уче и изводе закључке на основу понашања. На пример, рачунарске игре су један од примера система са агентима. Играч (агент) када игра неку рачунарску игру тражи најбоље решење како би победио у игри уз ограничен временски интервал [94].

Један од начина моделовања методом *ABS* је примена *UML - Unified Modelling Language* или дијаграма стања (*statechart*). Помоћу дијаграма стања се графички представљају различита стања у којима се могу наћи агенти, прелазна стања, догађаји који изазивају прелазна стања, као и времена и радње које агенти изводе у току свог животног века.

Најчешће коришћени софтвери за ову методу су: *RePast*, *Swarm* и *AnyLogic*. Примењују се у: култури, друштвеним системима, физичким, биолошким, еколошким, економским системима, војне сврхе, итд [95]. Недостаци ове методе су слабија примена у индустријским системима, као и мали број развијених софтвера који се користе за моделовање и симулацију применом ове методе. Најчешће се примењује на универзитетима за различите врсте истраживања.

6.5.1 Моделовање структуре система применом методе *SDS*

SDS се користи за моделовање и симулацију понашања сложених динамичких система применом рачунара [96]. Значајна је примена при анализи сложених динамичких система, где је могуће утврдити какви се ефекти добијају на систему при доношењу одређених одлука. За формирање *SDS* модела значајно је разумети узроке и последице проблема који се моделира. Разматрањем понашања система утврђују се зависности и петље између појединих елемената у систему.

Ову методу је развио 1956. године Jay Forrester, професор на *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Првобитно је примењивана код развоја модела за управљање производним и пословним система и звала се индустријска динамика, да би шездесетих година био промењен назив у *System Dynamics*. Касније је примењивана на различитим врстама система: друштвеним, еколошким, производним, услужним,

биолошким, пољопривредним, здравственим, итд. Модел *SDS* треба да има следеће карактеристике [97]:

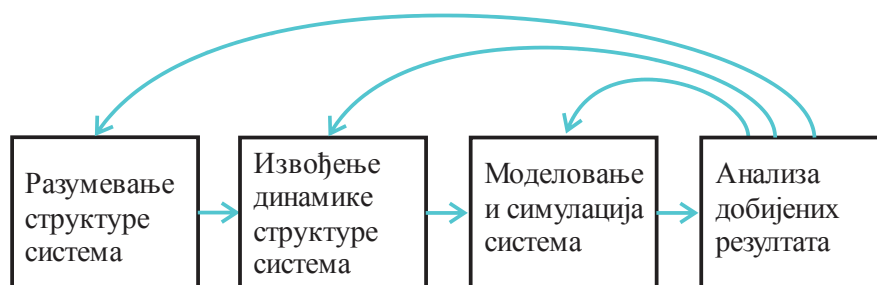
- описује било који проблем са узрочно - последичним везама,
- примена математичких формула при симулацији система,
- могућност примене великог броја променљивих,
- анализа података добијених симулацијом при промени одлука.

Сваки модел представља упрошћен приказ система. Да би био користан, не мора детаљно да одсликава систем и зависиће од примене модела за решавање неког проблема. За модел треба одредити који елементи система су најважнији, да модел не буде сувише сложен за практичну анализу.

Метода *SDS* заснива се на теорији повратне спреге (*feedback*) и контроле, а користи се за решавање сложених ситуација. Моделима се предвиђа будуће понашање система применом симулације. Ови модели поседују и одређена ограничења у погледу непрецизности и грешака које могу настати због неправилно креираног модела.

За анализу понашања сложених система при примени методе *SDS* најчешће се користе софтвери за моделовање као што су: *Arena*, *Open Modelica*, *DYNAMO*, *DYSMAP*, *iThink/STELLA*, *PowerSim*, *Vensim*, итд.

Полазна основа динамичког моделовања система је да се проучавају системи чије се понашање мења у времену. Циљ ове методе је да се разуме структура система који се анализује и да се креира одговарајући модел. На слици 6.18 су дате основне фазе у динамичком моделовању система.



Слика 6.18 Фазе у динамичком моделовању система

Прва фаза код динамичког моделовања је проучавање система са циљем да се што боље разуме његова структура. Креирање модела неког система може да врши само неко ко добро познаје систем који се моделује.

У другој фази се врши развој динамичких хипотеза, што је основа за формирање прецизног модела. Структура система се представља помоћу дијаграма којима се приказују зависности између променљивих или подсистема са циљем да се идентификује понашање система.

Трећа фаза је моделовање и симулација система. Модел треба да прикаже претходно дефинисану структуру система, а резултати симулације да потврде прогнозирано понашање.

Последња фаза се користи за анализу и верификацију добијених резултата и примену одређене стратегије. Уколико добијени резултати нису оптимални, спроводе се нове стратегије и понављају фазе ове методе, као што је приказано на слици 6.18.

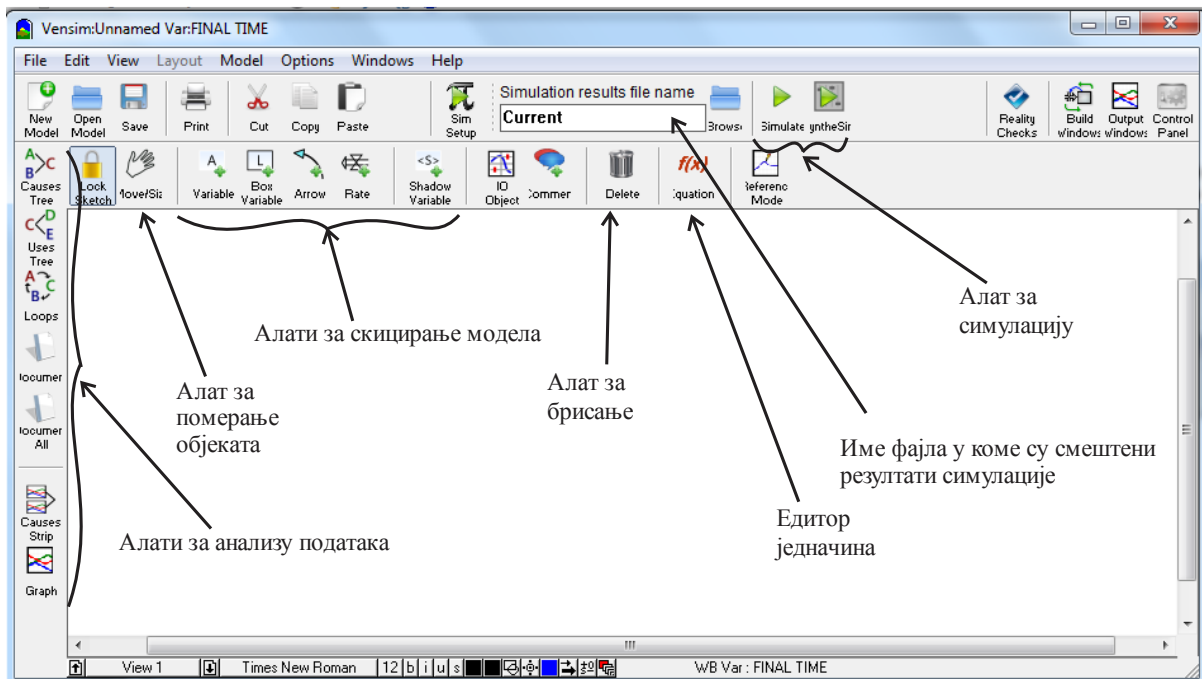
Стратегије које се пројектују и моделирају имају за циљ да се утврде њихови утицаји на систем и доношење одговарајућих одлука. Цео процес се може понављати како би се потврдила исправност увођења нове стратегије.

Сложени системи захтевају формирање модела, па је неопходно да се на основу модела изврши и симулација користећи одговарајуће софтвере. Прикупљањем података о раду неког система добијају се подаци који су основа за даљу анализу. Да би се проверила тачност креираног модела, неопходно је вршити различита тестирања применом реалног система.

Динамички модели су погодни за моделовање и симулацију сложених система који се могу налазити у различитим стањима. Тачност модела и излазних резултата је тешко проценити. Да би модел био што прецизнији, потребно је добро познавање система који се моделира, да се не би изоставили параметри који имају велики утицај на излазне резултате.

6.5.2 Софтвер за динамичко моделовање система

Vensim PLE је софтвер за визуелно моделовање који омогућава формирање модела, креирање документације, анализу система, симулацију и оптимизацију креираних модела динамичких система. Овај софтверски алат је развила фирма *Ventana Systems* 1985. године за решавање проблема управљања применом симулације. У том периоду је коришћен програмски језик *Pascal*, а потом *Lisp* и *C* за симулацију како би се смањило време за креирање модела. Софтвер је постао јавно доступан 1991. године, а до данас је непрекидно усавршаван до последње верзије 6.3 [38]. На слици 6.19 дат је приказ радног окружења овог софтвера.



Слика 6.19 Радно окружење *Vensim PLE*

Предност овог софтвера је што дозвољава позив екстерних функција (програмираних у неком програмском језику) које ће се користити за симулацију формираног модела. Екстерне функције се могу писати и у *MatLab*-у или неком другом

софтверу и користити за симулацију. Могуће је увозити моделе који су креирани у другим софтверима који се користе за моделовање и симулацију и прилагодити сопственим потребама.

У моделима се креирају различите везе (зависности) између променљивих, а на основу дефинисаног модела се могу вршити симулације различитих догађаја. Модел се у овом софтверу може креирати као:

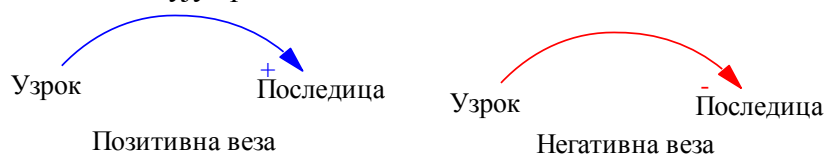
1. дијаграм узрочних петљи (*Causal Loop Diagram - CLD*) или
2. дијаграм тока система (*Stock and Flow Diagram - SFD*).

Дијаграм узрочних петљи се користи за представљање међусобне зависности појава или стања у систему и повратне везе које настају између дефинисаних стања. Овај дијаграм се састоји од две или више узрочне везе које спајају више различитих елемената у моделу. Дијаграми узрочних петљи показују узрочно - последичне везе између елемената.

Код дијаграма узрочних петљи користе се два основна типа веза повратних информација:

1. позитивне (којима се приказује побољшање стања опреме)
2. негативне (којима се приказује деградација стања опреме).

Стрелицом везе се означава смер, а знак (+) или (-) уз ту стрелицу представља позитивну или негативну везу (слика 6.20) [98]. Позитивна веза доводи до повећања вредности последице настанка догађаја услед повећања вредности узрока или обратно, смањење последице настанка догађаја услед смањења узрока. На пример, ако се посматра процес производње, трошкови производње расту са повећањем произведеног броја производа. Код негативне везе се услед повећања вредности последице смањује вредност узрока и обратно. На примеру производње, негативна веза би била да се продајом производа смањују трошкови.



Слика 6.20 Графички приказ позитивне и негативне везе

Уколико више веза повезују узрок и последицу, онда се добија повратна петља и дијаграм се замењује са једном кружном стрелицом која је у средини обележена словом и бројем. Бројеви су целобројне вредности и означавају редни број петље.

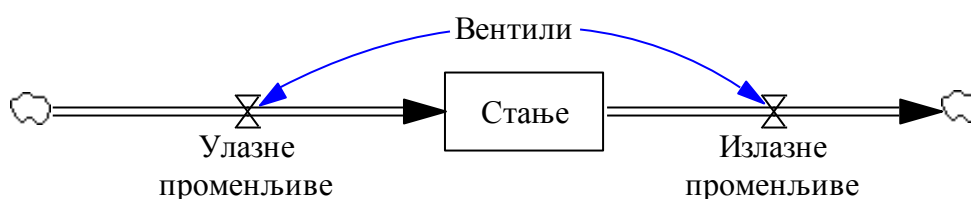
Позитивна повратна петља се обележава са R (*Reinforcing* - појачање) и представља скуп веза којима се добија стални пораст или пад вредности. Као пример, размотрићемо настанак квара на опреми. Услед повећања броја кварова трошкови одржавања расту. Уколико нема резервне опреме, набавља се опрема лошег квалитета јер је потребно да опрема што пре буде замењена. С повећањем броја кварова (узрок), увећавају се трошкови одржавања и настаје већи број прекида у раду (последице).

Елементи негативне повратне петље B (*Balancing* - равнотежа) утичу на промену смера деловања, због чега систем прелази у стационарно стање. На пример, при превентивном одржавању или континуалном надзору опреме, утврђује се почетак настанка дефеката (цурење уља, вибрације и сл.). Опрема се повлачи из употребе и дефекти се отклањају пре настанка квара. Повећањем превентивних активности одржавања смањују се трошкови одржавања, елиминишу застоји у раду и планира се набавка резервне опреме.

Ако су све узрочно - последичне везе позитивне, онда ће читава петља бити позитивна. Уколико у петљи има негативних веза, тип петље ће зависити од броја негативних веза. Позитивна повратна петља се добија ако је у петљи паран број негативних веза, а ако је непаран број негативних веза добија се негативна повратна петља.

Дијаграм тока је детаљнији начин приказивања структуре система у односу на дијаграм узрочних петљи. Користи се за приказивање понашања система и зависности између променљивих у систему. На основу овог дијаграма утврђују се стања у систему и добијају информације на основу којих се доносе одлуке. Креирањем овог дијаграма, формира се први корак за симулацију модела, јер се дефинишу величине и свакој се додељује одређена вредност или дефинишу формуле које су значајне за опис понашања система. Код дијаграма тока динамички модел система се приказује помоћу елемената приказаних на слици 6.21. Елементи дијаграма тока су следећи:

- *Правоугаоник* - приказују се одређена стања у било ком тренутку t .
- *Улазне променљиве (inflows)* - дебље стрелице које улазе у правоугаоник (повећава параметре дефинисаног стања).
- *Изразне променљиве (outflows)* - излазе из правоугаоника и представљају промене стања у временском интервалу $t+dt$ (смањују се вредности параметара у стању).
- *Вентили* - ознака која врши контролу улазних и излазних променљивих.
- *Облаци* - представљају изворе и одредишта за токове информација. Извор представља стање из кога настаје модел, а одредишта представљају стања у којима се прикупљају информације.



Слика 6.21 Елементи дијаграма тока

Дијаграм тока се може прецизно представити математичким формулама. У дефинисаном стању се интегришу токови информација, па се величина промене стања може приказати математичком формулом [96]:

$$S(t) = \int_{t_0}^t [U_p(s) - I_p(s)] ds + S(t_0) \quad (6.14)$$

где су:

$S(t)$ - промена стања у тренутку t ,

$S(t_0)$ - промена стања у тренутку t_0 ,

$U_p(s)$ - вредност улазних променљивих у било ком тренутку s који се налази између почетног тренутка t_0 и посматраног тренутка t ,

$I_p(s)$ - вредност излазних променљивих у било ком тренутку s који се налази између почетног тренутка t_0 и посматраног тренутка t .

Промена стања у било ком тренутку може се извести помоћу диференцијалне једначине:

$$\frac{dS(t)}{dt} = U_p(t) - I_p(t) \quad (6.15)$$

6.5.3 Динамички модел система одржавања

Код система одржавања догађаји који настају могу бити дискретни, као што је изненадни настанак кварова, при чему се може креирати велики број интерактивних процеса као што су: погоршање стања опреме, репарација опреме и набавка резервних делова. За трајање времена одржавања и трајање времена елиминисања кварова се претпоставља да су детерминистичке вредности и да нема великих застоја када се посматра систем у целини.

Симулацијом превентивних активности утврђује се значај различитих стратегија одржавања у погледу трошкова, расположивости система и погоршања стања система. На овај начин је омогућено боље разумевање динамичког модела функција одржавања система.

Сваки систем се састоји од већег или мањег броја елемената који обављају одређене активности. Планирање одржавања система у целини зависи од модела система одржавања. Генерално, систем одржавања се може поделити на два подсистема:

1. *Подсистем превентивног одржавања* у коме се унапред планирају одређене активности одржавања.
2. *Подсистем корективног одржавања* где се активности спроводе у случају погоршања система који доводи до настанка кварова.

У општем моделу, превентивне активности одржавања се не деле на различите категорије, већ се генерално могу поделити на активности као што су замена, подешавања, поправке, ревитализација, регенерација уља, уградња система за континуални надзор, итд.

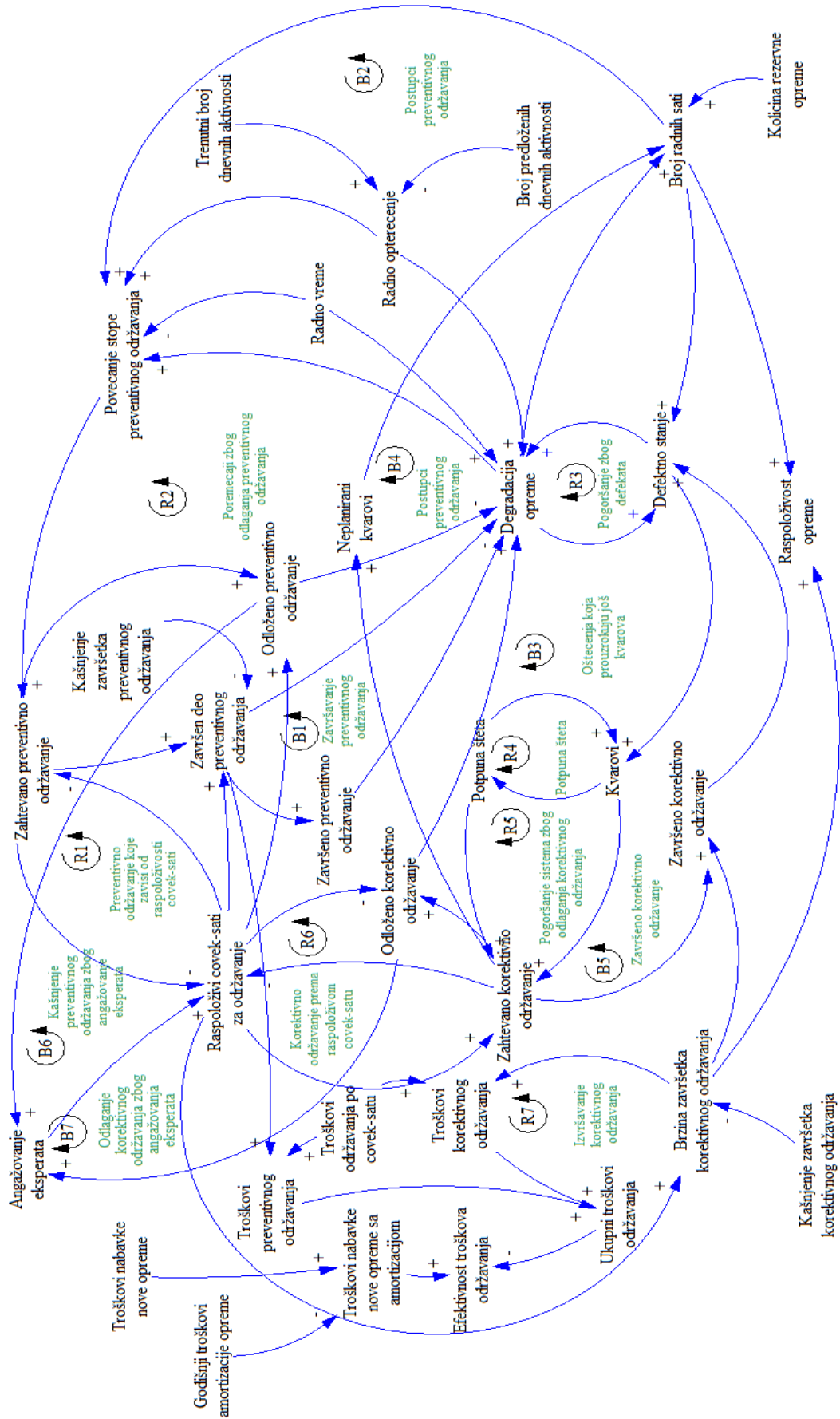
6.5.4 Дијаграм узрочне петље система одржавања

Овај дијаграм је користан за обухватање зависности између активности одржавања. Дијаграм узрочне петље приказан на слици 6.22 је општи дијаграм система одржавања и може се применити на већину техничких система са малим изменама. Дијаграм се састоји од четири подсистема, који се односе на:

1. превентивно одржавање,
2. корективно одржавање,
3. ток настанка кварова,
4. трошкове одржавања.

Све променљиве које су дефинисане у дијаграму су међусобно повезане.

Повратне петље на слици 6.22 приказују да је, услед већег оптерећења опреме или погоршања стања опреме, потребно спроводити интензивније превентивно одржавање. На тај начин опрема се доводи у стање као да је нова. Међутим, уколико се смањују расположиви ресурси неопходни за одржавање, долази до одлагања активности одржавања.



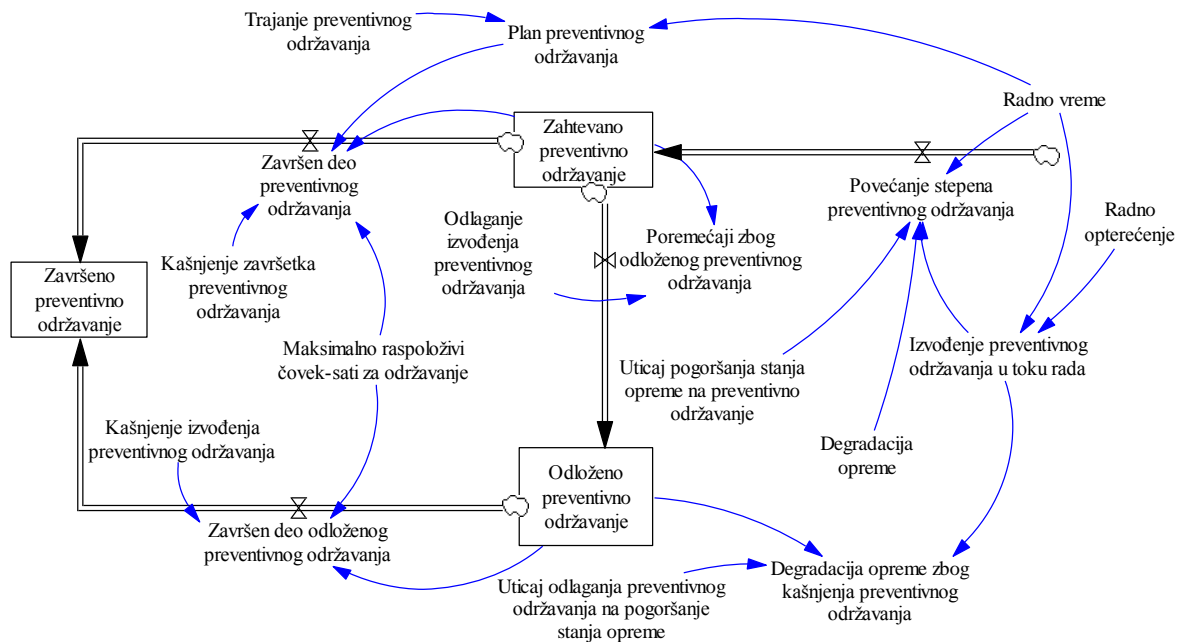
Слика 6.22 Дијаграм узрочне петље система одржавања

Расположива радна снага се мора повећати са повећањем ангажовања експерата из области одржавања посматране опреме. Продужење радног времена опреме или погоршање стања опреме утичу на раст броја кварова. Због тога ће се повећати обим корективног одржавања. Раст обима корективних активности утиче на раст нерасположивости ресурса. Смањење ресурса доводи до пораста корективног одржавања, што утиче на пораст ангажовања експерата да би се побољшала расположивост људских ресурса.

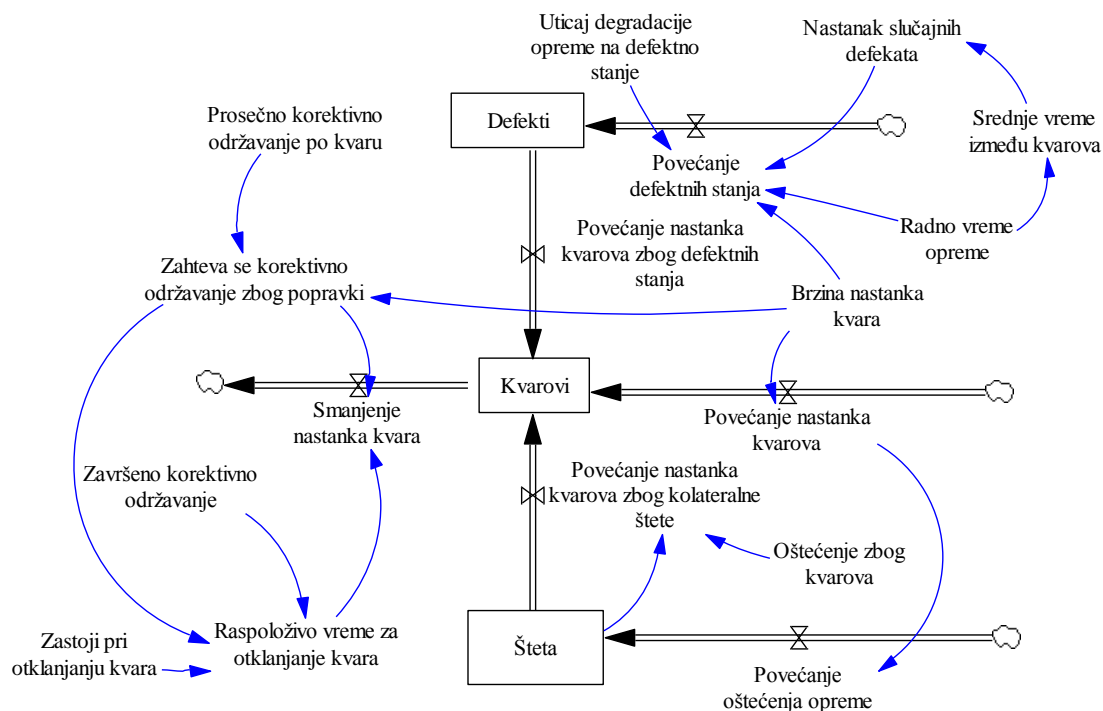
У зависности од врсте техничког система могуће је додавати одређене узрочно - последичне везе, како би се комплетирао дијаграм. Овај дијаграм је значајан за формирање дијаграма тока, који мора бити једноставнији, односно који се добија разлагањем овог дијаграма на мање целине.

6.5.5 Дијаграм тока система одржавања опреме

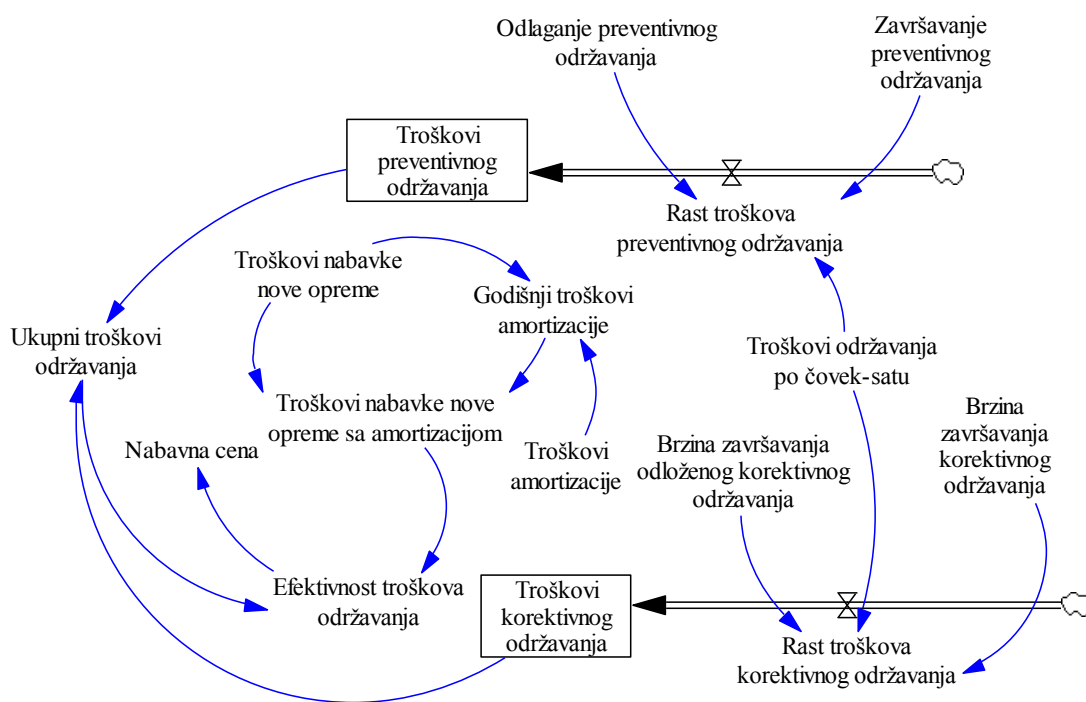
Дијаграм тока се користи за представљање модела система и симулацију применом једначина које се дефинишу у моделу. Претходно дефинисан модел се дели на четири подсистема: подсистем превентивног одржавања (слика 6.23), подсистем настанка квара (слика 6.24), подсистем трошкова одржавања (слика 6.25) и подсистем корективног одржавања (слика 6.26) [99, 100]. Дијаграм тока преноси информације о стањима у систему као и о нивоу груписања у моделу. Ови дијаграми се формирају на основу дијаграма узрочне петље са слике 6.22.



Слика 6.23 Дијаграм тока превентивног одржавања

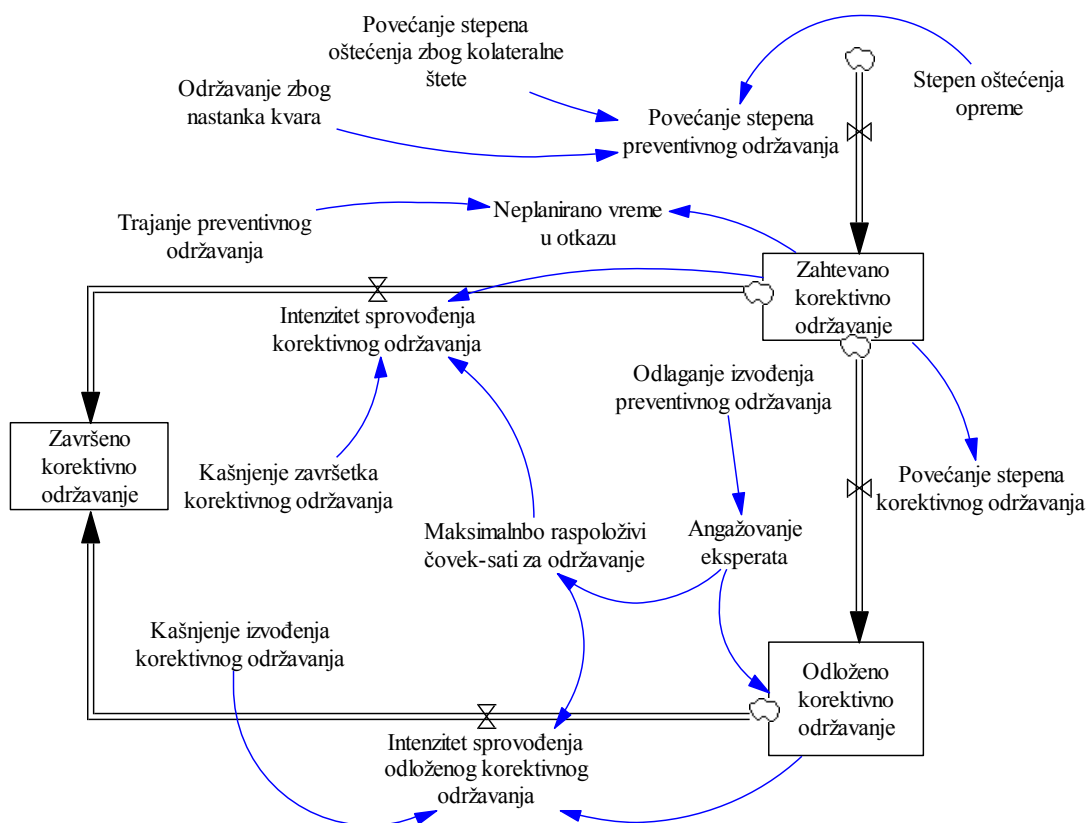


Слика 6.24 Дијаграм тока настанка кварова



Слика 6.25 Дијаграм тока трошкова одржавања

За свако стање (на сликама се означава правоугаоником) се може извршити симулација применом математичких формула и у зависности од вредности величина које утичу на дефинисана стања.



Слика 6.26 Дијаграм тока корективног одржавања

6.6 Моделовање и симулација трошкова одржавања енергетског трансформатора

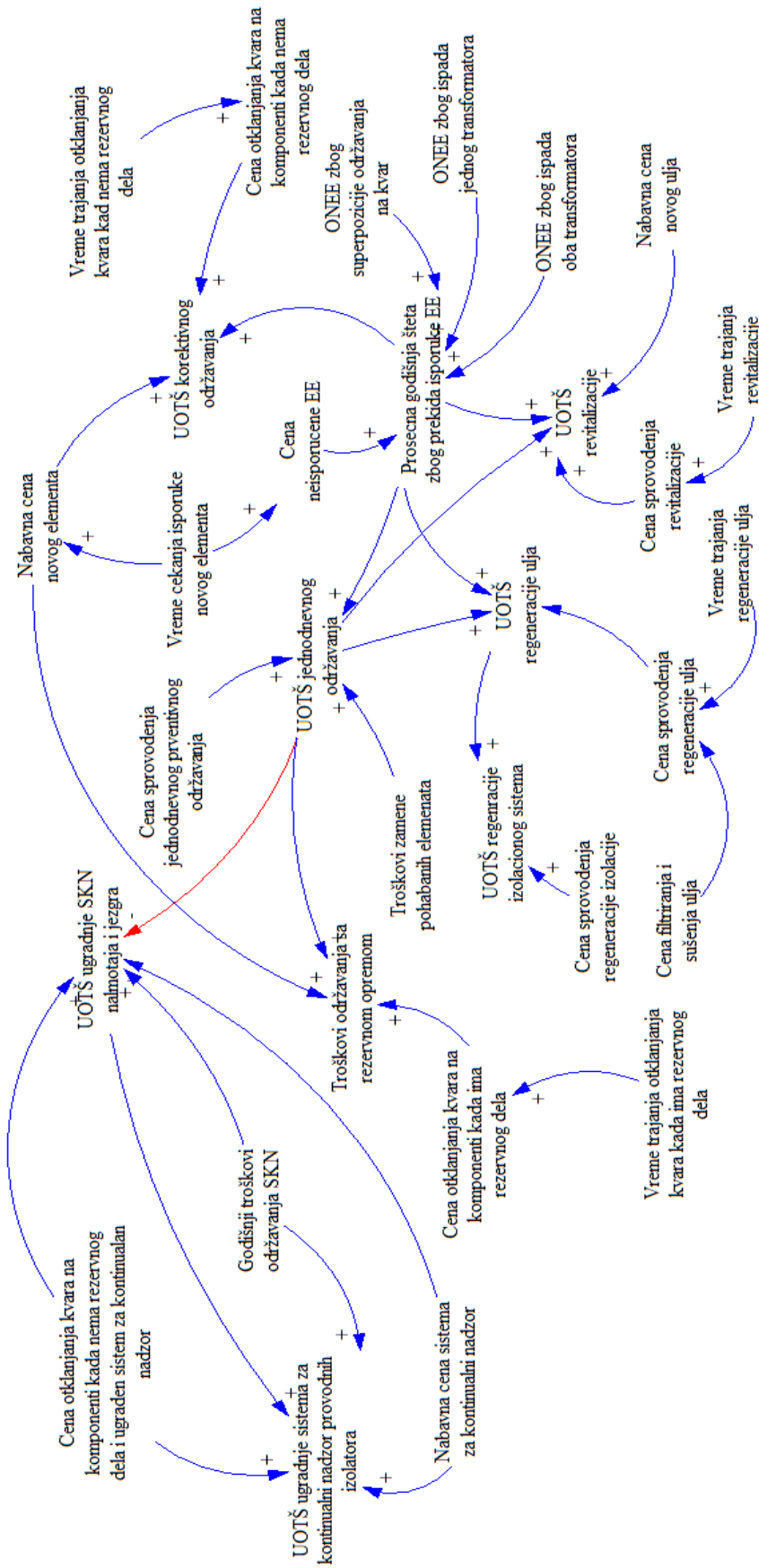
Дијаграм узрочних петљи који се формира на основу модела *SDS*, представља графички приказ узрока и последица за различите параметре система. У току моделовања овај дијаграм представља прелиминарну скицу поједностављеног модела. На основу дијаграма узрочних петљи се формирају дијаграми токова. За развијен динамички модел превентивних активности одржавања енергетског трансформатора, могу се креирати дијаграми узрочних петљи за одређивање трошкова и штета које настају на елементима трансформатора применом предложених активности.

Улога дефинисаног динамичког модела је:

1. Одређивање трошкова и штета које трпе испоручилац електричне енергије и потрошачи због настанка кварова.
2. Спровођење превентивних активности са циљем минимизације трошкова и повишења расположивости опреме.
3. Уградња система за континуални надзор појединих елемената трансформатора.

6.6.1 Дијаграми узрочне петље и токова трошкова одржавања енергетских трансформатора

На основу предложеног динамичког модела одржавања енергетског трансформатора, креиран је дијаграм узрочне петље на слици 6.27.



Слика 6.27 Дијаграм узрочне петље трошкова одржавања енергетског трансформатора

Скраћенице које су коришћене на наредним сликама су:

UOTŠ - Укупни очекивани трошкови и штете,

SKN - Систем за континуални надзор,

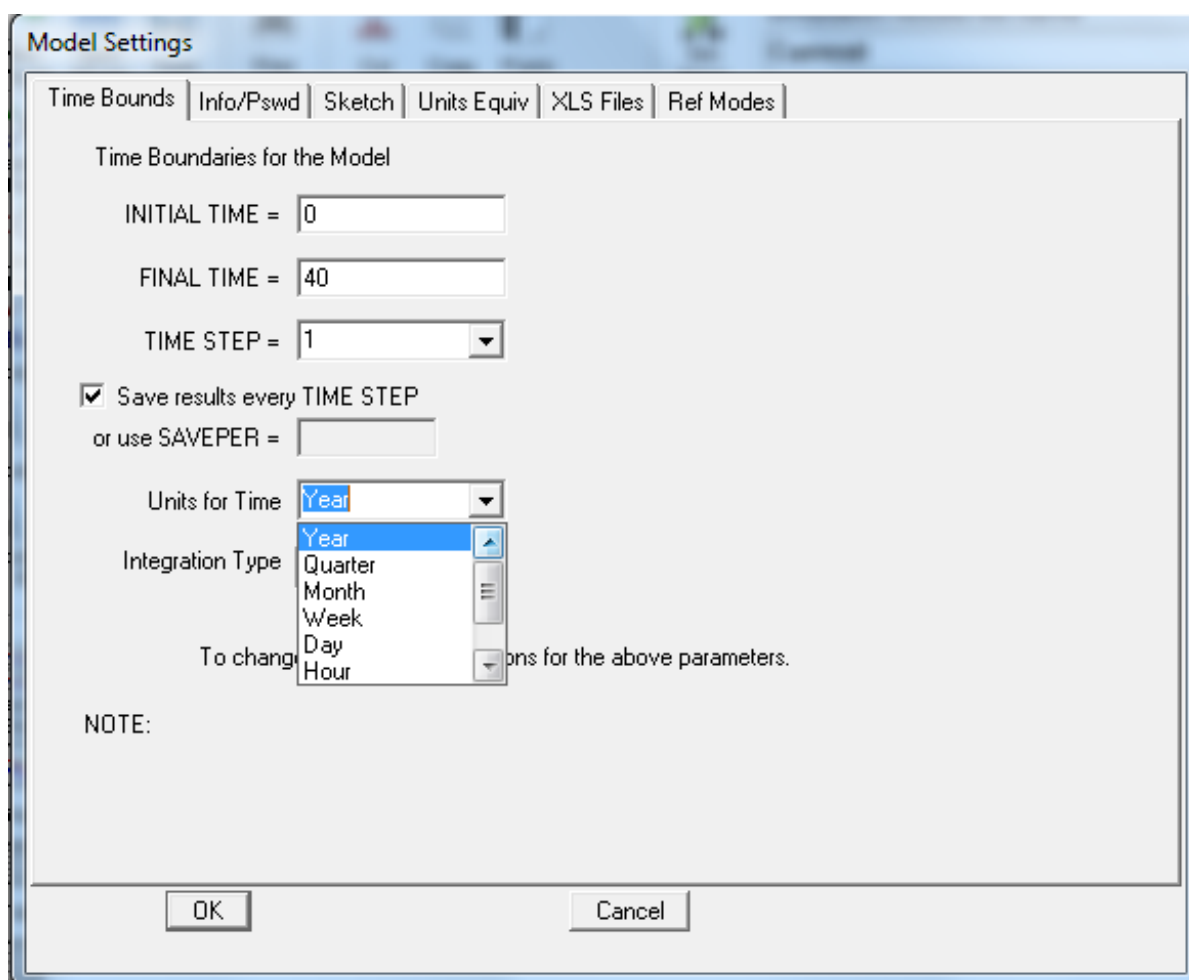
ONEE - Очекивана неиспоручена електрична енергија,

USKN - Уградња система за континуални надзор,

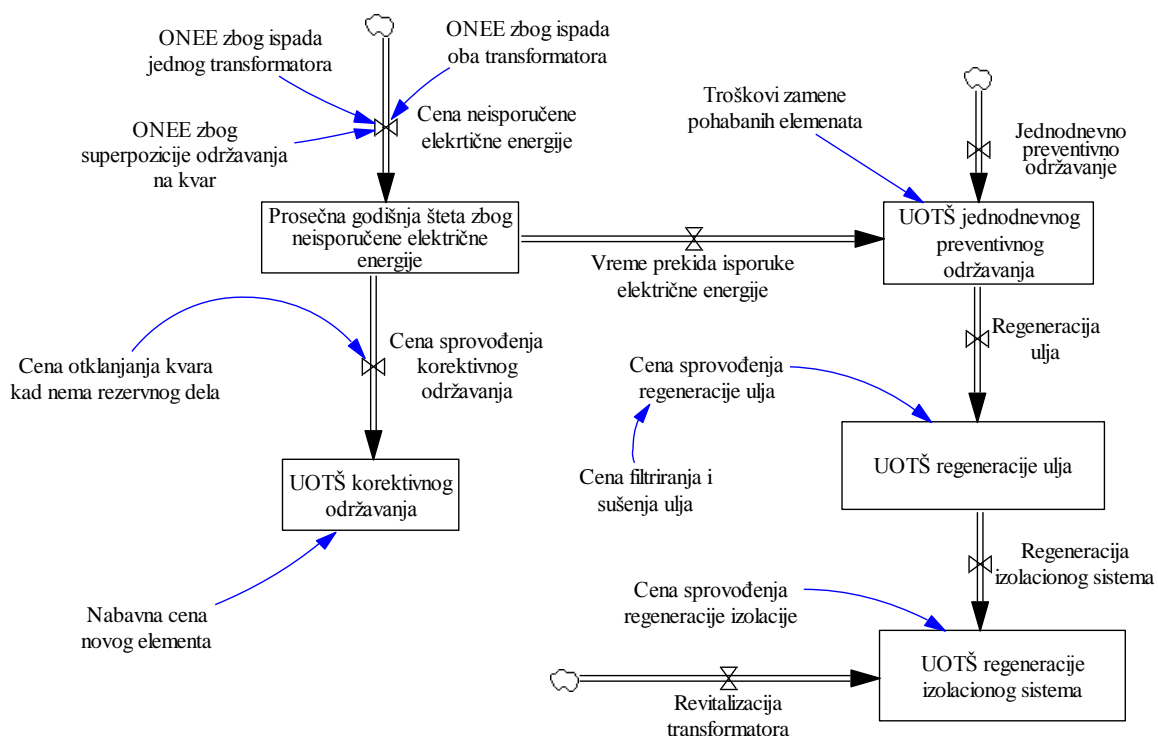
EE - Електрична енергија.

При креирању модела дијаграма тока, на почетку се дефинишу почетни параметри модела као што је приказано на слици 6.28. За модел трошкова енергетског трансформатора време је приказано у годинама и усваја се плански период експлоатације од 40 година.

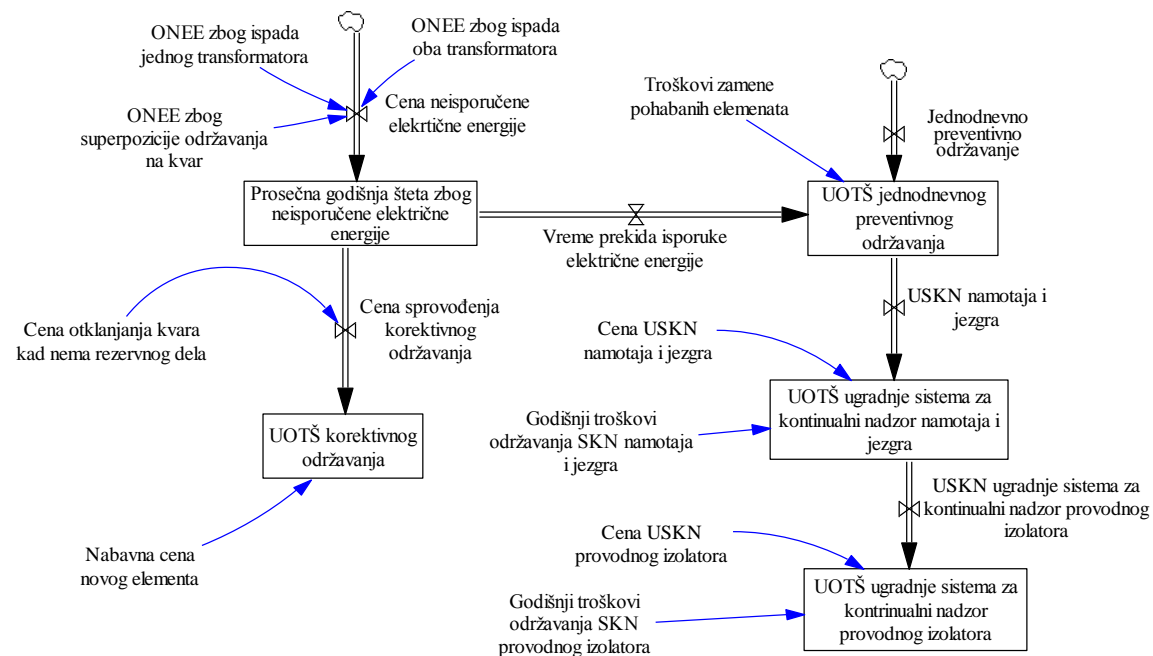
На основу предложеног модела и дијаграма узрочне петље, конструисани су дијаграми тока трошкова одржавања енергетског трансформатора у зависности од врсте одржавања која се спроводи. На слици 6.29 приказан је дијаграм тока трошкова одржавања енергетског трансформатора за случај регенерације уља и изолационог система, а на слици 6.30 за случај уградње система за континуални надзор.



Слика 6.28 Почетни параметри модела



Слика 6.29 Дијаграм тока трошкова одржавања енергетског трансформатора за случај регенерације уља и изолационог система и ревитализације трансформатора



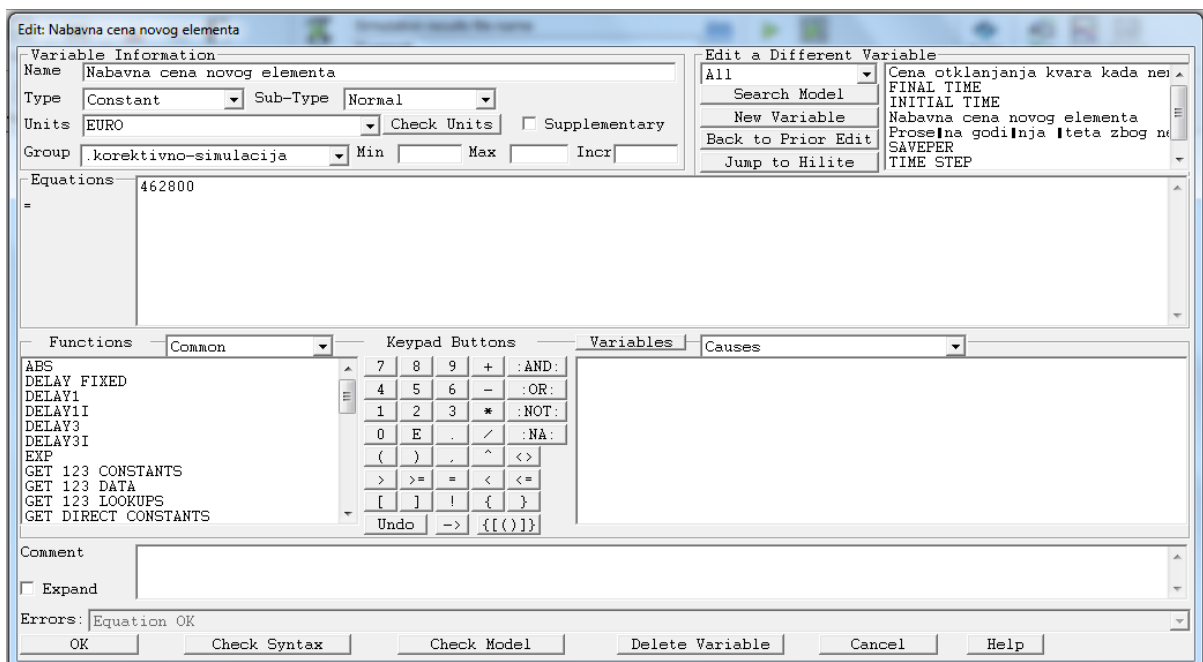
Слика 6.30 Дијаграм тока трошкова одржавања енергетског трансформатора за случај уградње система за континуални надзор

6.6.2 Симулација укупних очекиваних трошкова експлоатације енергетског трансформатора применом Vensim софтвера

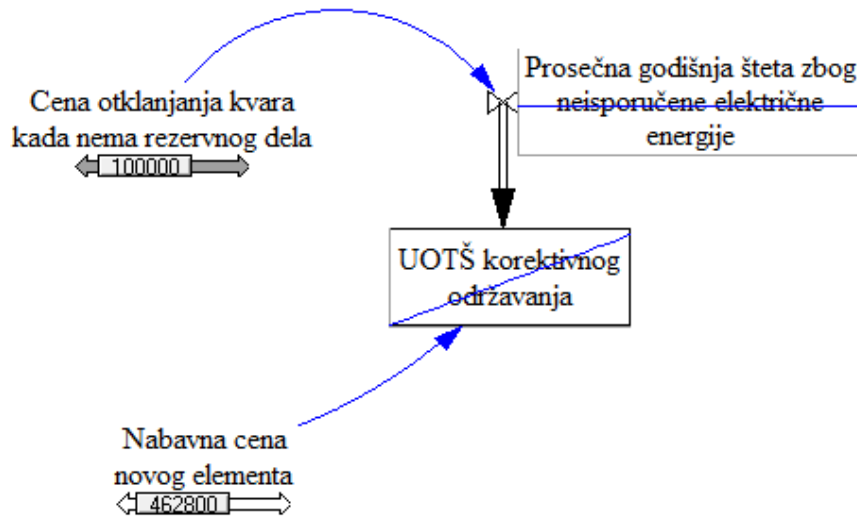
Да би се извршила симулација креираног модела који је представљен преко дијаграма тока, неопходно је прво за сваку варијаблу задати одговарајуће формуле, односно вредности користећи иконицу *Equations*. Кликом на било коју варијаблу добија се едитор као на слици 6.31. У едитор се у оквиру дела *Variable Information* уносе основне информације као што су име, тип, јединица мере, итд. Једначине се уносе у средњи део означен као *Equations* где је могуће користити и системски дефинисане функције дате у делу *Functions*. Уколико корисник унесе назив променљиве или погрешну формулу у делу *Errors* се пријављује коментар о грешкама. Делови *Check Syntax* и *Check Model* проверавају синтаксу задате једначине и модела, како би симулација могла да се изврши. Уколико постоји било каква грешка, симулација се неће стартовати док се грешка не исправи.

Када се задају почетне вредности свакој варијабли у моделу, као и једначине за свако стање, први пут се симулација стартује користећи алат (иконицу) *SyntheSim*. На величинама које су дефинисане као константне вредности (*Cena otklanjanja kvara kada nema rezervnog dela* и *Nabavna cena novog elementa*) могуће је мењати вредност директно померајући клизач који је дат на слици 6.32, и на тај начин за промене вредности симулирати укупне очекиване трошкове и штете које се у овом случају разматрају.

Вредности које се добијају симулацијом трошкова могу се представити са алатима који се налазе са десне стране радног окружења. На слици 6.33 приказан је граф којим се симулирају укупни очекивани трошкови корективног одржавања за плански период експлоатације од 40 година. Спровођењем ове стратегије одржавања добијају се максимални трошкови одржавања.



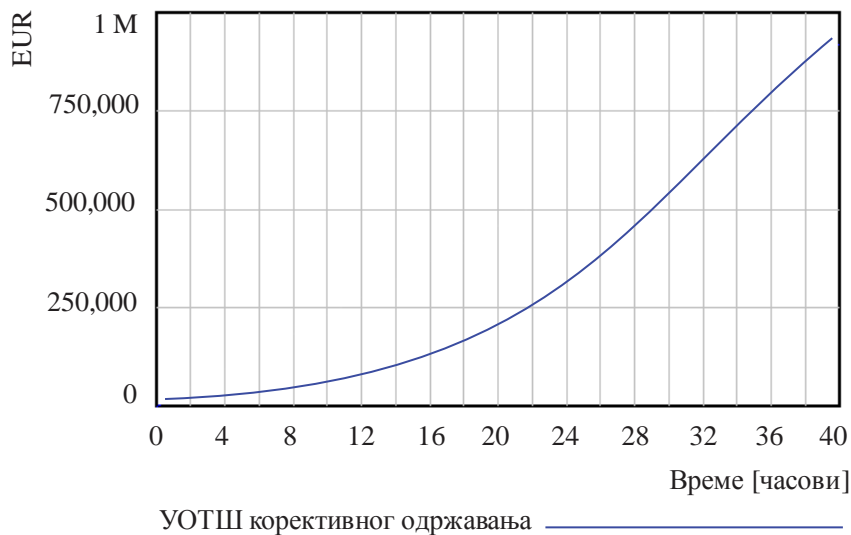
Слика 6.31 Едитор за унос формула и основних информација о варијабли



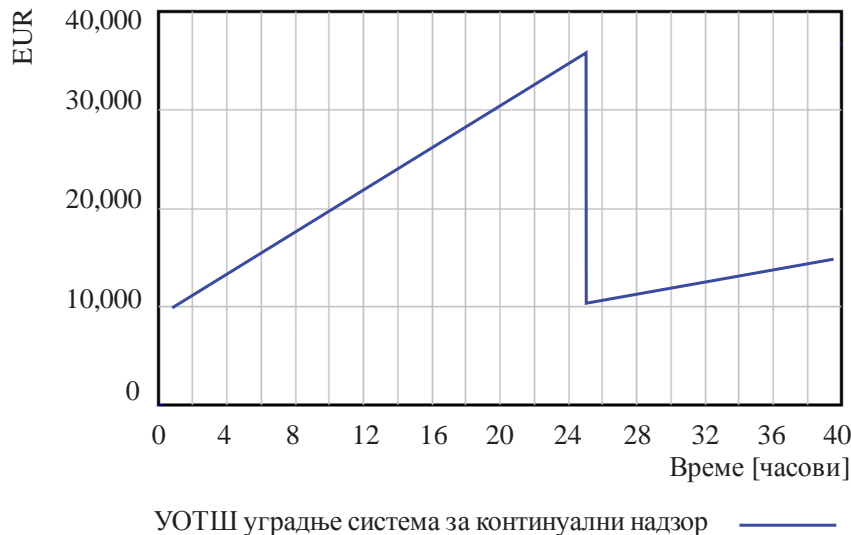
Слика 6.32 Приказ дела модела за симулацију укупних очекиваних трошкова корективног одржавања

Симулација укупних минималних очекиваних трошкова одржавања енергетског трансформатора добија се у случају спровођења низа активности које су приказане на дијаграму тока са слике 6.33. Уградњом система за континуални надзор намотаја, језгра, проводних изолатора и ревитализацијом трансформатора на почетку 25. године експлоатације, извршена је симулација ових трошкова и приказана на слици 6.34.

Применом софтверског алата *Vensim* добијају се приближно исти резултати као што су добијени аналитичким методама које су дате у петом поглављу.



Слика 6.33 График симулације укупних очекиваних трошкова корективног одржавања енергетског трансформатора



Слика 6.34 График симулације минималних укупних очекиваних трошкова одржавања енергетског трансформатора

6.7 Развој софтвера за симулацију трошкова одржавања

Део истраживања у раду се односи на развој софтвера за предложен модел одржавања енергетског трансформатора. Апликација је развијена у објектно - оријентисаном програмском језику *Java* и *NetBeans IDE 8.1* развојном окружењу [101, 102]. Овај програмски језик је одабран за израду софтвера јер је независан од платформе и оперативног система на коме се користи. *NetBeans* садржи велики број библиотеке за рад са графиком који се могу интегрисати у апликације.

Примена објектно оријентисаних програмских језика за креирање симулација има значајне предности у односу на процедурално програмирање. Најважније су:

- Изворни кôд написан у објектно оријентисаном програмском језику је прегледнији јер је груписан у класе, док је код традиционалног програмирања кôд написан као скуп функција (подпрограма, процедура) организованих у једној целини.
- Једноставно креирање *GUI*.
- Основна идеја објектно оријентисаног програмирања је примена апстракције у смислу разлагања сложених проблема у мање целине које се додељују објекту.
- Могућност примене наслеђивања које се може искористити при моделовању.

У апликацији је укључена анализа трошкова компоненти енергетског трансформатора. Развијен је *GUI* којим се врши интеракција са корисником. Изворни код се састоји од сложених функција које су дате у четвртом поглављу докторске дисертације. *GUI* омогућава једноставност и флексибилност у раду апликације, са могућношћу додавања различитих функционалности.

При стартовању апликације добија се почетна страна која је дата на слици 6.35. Дата је могућност уноса/измене података за основне елементе енергетског трансформатора који су разматрани у моделу. За сваки елемент се посебно врши унос/измена података који се користи за прорачуне (слика 6.36). При покретању апликације, дати су изворни подаци предложени у моделу, са могућношћу измене

података. За друге типове трансформатора могу се мењати подаци и одредити трошкови за планирани период експлоатације.



Слика 6.35 Приказ почетне стране апликације

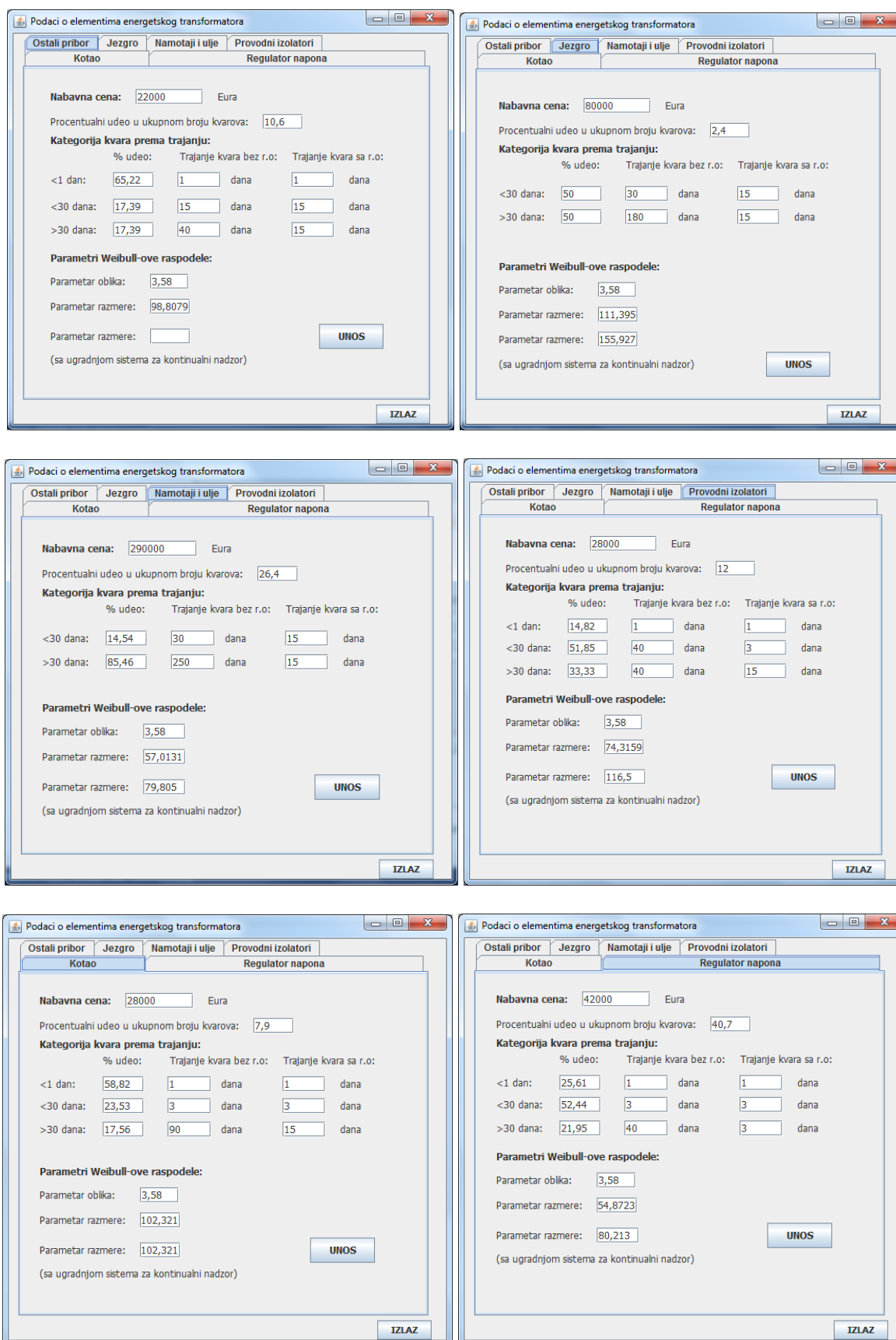
Подаци о елементима енергетског трансформатора су смештени на једну форму, при чему је креирано шест картица (табова) за сваки елемент посебно, због прегледности и једноставности.

6.7.1 Примена *JFreeChart* библиотеке за креирање графика

JFreeChart је *Java* библиотека која омогућава цртање графика у креираним апликацијама. Карактеристике ове библиотеке су следеће [103]:

- Документован и доследан *API* (*Application Program Interface*), који подржава велики број типова графика (графици у облику пите, стубичасти графици, линијски, тачкасти, *Gantt* графици, комбиновани итд);
- Флексибилан дизајн који се једноставно наслеђује и може се користити за различите врсте апликација;
- Може се користити за различите врсте *Swing* и *JavaFX* компоненти и експортирати у фајлове у облику слика (са екстензијама *PNG* и *JPEG*), као и фајлова који подржавају векторску графику (са екстензијом *PDF*, *EPS* и *SVG*);
- *JFreeChart* је написан у *Java* програмском језику и може се применити само на *Java 2* платформи (*JDK 1.2.2* или новијим верзијама).

У дисертацији је примењен код за цртање линијског дијаграма, како би се приказали трошкови који настају при одржавању трансформатора. У зависности од избора активности превентивног одржавања, формирају се скупови података. На слици 6.37 дат је приказ основног кода који се користи за реализацију линијског графа.



Слика 6.36 Приказ дела апликације за унос података за сваки елемент енергетског трансформатора

```
// Kreiranje objekta tipa linijskog dijagrama koji se odnosi na Korektivno održavanje
XYSeries series = new XYSeries("Korektivno održavanje");

// Kreiranje objekta tipa kolekcije za linijski dijagram
XYSeriesCollection dataset = new XYSeriesCollection();
dataset.addSeries(series); // Dodavanje podataka u skup

// Kod za generisanje grafa
JFreeChart chart = ChartFactory.createXYLineChart(
    " ", // Naslovna linija grafa
    "Vreme (godine)", // x - osa
    "Očekivani troškovi i štete (EURO)", // y - osa
    dataset, // objekat u kome se nalaze skupovi podataka
    PlotOrientation.VERTICAL, // Orijentacija crtanja grafa
    true, // Prikaz legende
    true, // Korišćenje obaveštenja
    false // Konfigurisanje grafa pri generisanju URL - a
);

try {
    /* Kod za čuvanje grafa na lokaciji C:\\ pod imenom chart.jpg, 500 - širina slike, 300
    - visina slike u pikselima*/
    ChartUtilities.saveChartAsJPEG(new File("C:\\chart.jpg"), chart, 500, 300);

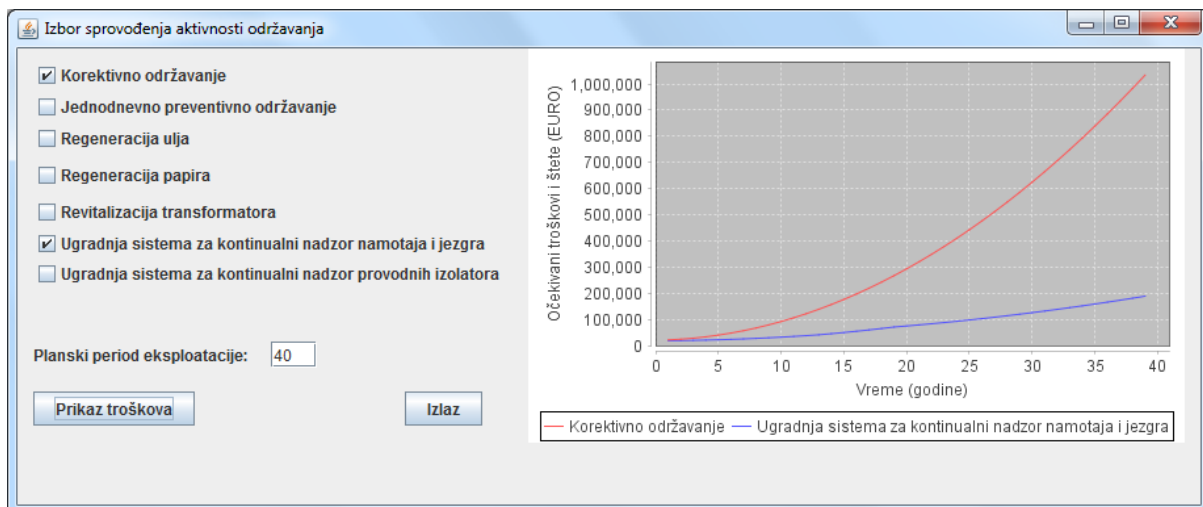
    /* Kod za podešavanje panela na kome će biti prikazan graf*/
    jPanel1.setLayout(new java.awt.BorderLayout());
    jPanel1.setVisible(true);
    jPanel1.setSize(500, 300);

    /* Kreiranje objekata Klase ChartPanel za prikaz grafa, koji se dodaje u panel, jer se
    graf ne može direktno ubaciti u panel */
    ChartPanel CP = new ChartPanel(chart);
    CP.setPreferredSize(new Dimension(500, 300));
    CP.setMouseWheelEnabled(true);

    jPanel1.add(CP, BorderLayout.CENTER);
    jPanel1.validate();
} catch (IOException e) {
    System.err.println("Problem pri kreiranju grafa.");
}
}
```

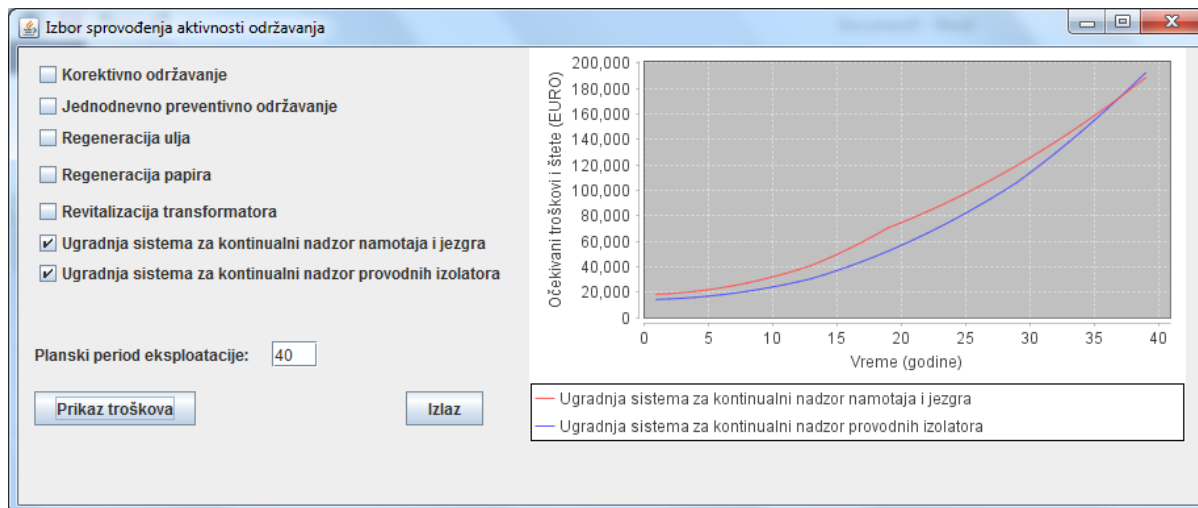
Слика 6.37 Source code који се користи при цртању линијских графова [103]

У случају избора прве опције „Корективно одржавање“ и „Уградња система за континуални надзор намотаја и језгра“ (слика 6.38) и одабира *Button* контроле „Prikaz troškova“ црта се график за задате вредности елемената трансформатора.



Слика 6.38 Упоредни приказ избора трошкова корективног одржавања и трошкова уградње система за континуални надзор намотаја и језгра

При избору опције „Уградња система за континуални надзор намотаја и језгра„ и „Уградња система за континуални надзор проводних изолатора„ црта се нови график на истом панелу. Постоји могућност одабира упоредног приказа више од једне активности, при чему се на једном дијаграму приказују упоредни графици за одабране опције.



Слика 6.39 Упоредни приказ избора трошкова уградње система за континуални назор проводних изолатора и трошкова уградње система за континуални надзор намотаја и језгра

6.8 Остале методе за симулацију у анализи поузданости

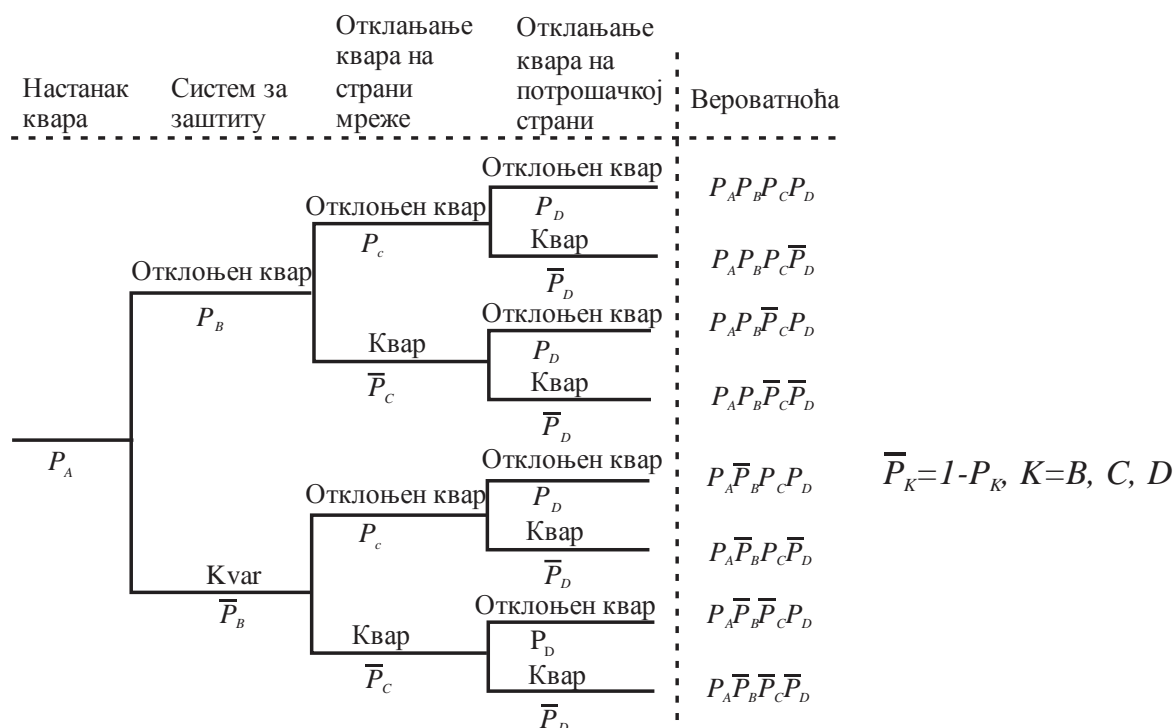
Најчешће коришћене методе које се користе при симулацији у анализи поузданости су [104]:

- Анализа стабла отказа (*FTA - Fault Tree Analysis*)
- Анализа врста и последица отказа (*FMEA - Failure Modes and Effects Analysis*)

6.8.1 Анализа стабла отказа - FTA

FTA је метода која испитује сваки догађај у систему који одговара унапред задатом догађају. За сваки нежељени догађај се одређује вероватноћа да елемент отказује или не отказује. Уколико иницијални нежељени догађај има n зависних догађаја, онда ће у стаблу отказа постојати 2^n могућих исхода. Вероватноћа сваког исхода је једнака производу вероватноћа сваког стања у стаблу отказа.

Као пример, разматра се квар који настаје у систему са вероватноћом P_A . Када квар настане, систем за заштиту ће покушати да елиминише квар са вероватноћом P_B . Вероватноћа да ће квар бити отклоњен код потрошача који се налазе на страни мреже је P_C , а вероватноћа да ће квар бити отклоњен на страни потрошача је P_D . Стабло отказа се креира као комбинација вероватноћа настанка кварова и обнављања, при чему је свакој путањи додељена одређена вероватноћа. Свака комбинација успешног или неуспешног отклањања квара одговара формираним путањама стабла отказа. Вероватноћа било ког исхода се добија множењем одговарајуће вероватноће сваког исхода квара или враћања у стање рада. Стабло отказа овог примера дато је на слици 6.40.



Слика 6.40 Пример стабла отказа са вероватноћама за сваки исход квара или враћања у радно стање

Резултати анализе стабла квара су вероватноће свих догађаја у систему који су иницирани почетним догађајима. Ови резултати се могу посматрати као резултати анализе поузданости одређивањем утицаја система на сваки коначни догађај и прорачуном важности овог утицаја преко вероватноће настанка посматраног догађаја.

6.8.2 Анализа врста и последица отказа - FMEA

FMEA је индуктивна метода којом се идентификују сви могући начини настанка кварова и њихов утицај на поузданост система. За сваки елемент неопходне су следеће информације [105]:

- врсте кварова који могу настати
- могући узроци настанка сваког квара појединачно
- могуће последице квара на систем
- вероватноћа настанка сваког квара
- мере које се спроводе ради смањења интензитета кварова или утицаја квара на систем.

Ова метода може узети у обзир и степен критичности настанка квара на систем, па се у том случају метода назива FMECA. Ова метода је слична техникама аналитичке симулације где се критичност оцењује као комбинација јачине последице и вероватноћа последице квара. Ова проширена метода се углавном користи у војне сврхе, код нуклеарних електрана и на системима где настанак квара може да проузрокује катастрофалне последице по људе и животну средину. Ова метода није коришћена у раду.

7. ЗАКЉУЧАК

7.1 Увод

Ако се изузме инвестирање у изградњу нових објеката, другу ставку по величини у пословању сваког предузећа, после трошкова за плате запослених, представљају трошкови одржавања употребљених техничких система.

Према ИЕС - дефиницији, под одржавањем се подразумева "скуп свих техничких и административних мера које се предузимају ради:

- обезбеђења да елементи и објекти дугорочно обављају предвиђену функцију и
- повратка у исправно, радно, стање након испада из погона због кварова".

Не постоји концепт, метода или уређај чијом применом се у потпуности могу предвидети, детектовати или отклонити поремећаји, деградациони процеси и услови који могу довести до делимичног или потпуног нарушавања предвиђене функције било ког типа електричне опреме. Међутим, адекватним одржавањем сви напред поменути утицаји се могу свести на најмању могућу меру, за задате услове експлоатације.

Имајући у виду променљивост амбијенталних услова у којима опрема ради као и врсту и променљивост оптерећења у току читавог периода експлоатације, у раду су обрађени сви чиниоци који имају битан утицај на функционалност система и представљени математичким моделима, чијом применом је могуће утврдити када треба спровести неку од превентивних активности, ради евентуалног отклањања поремећаја у најранијој фази развоја, а да би се спречио настанак крупних кварова на појединим функционалним целинама.

Да би се избегла преклапања са досадашњим истраживањима, прегледана је обимна литература из области моделирања, симулације, поузданости и одржавања.

Кључни резултат рада је нов модел за динамичко планирање превентивних експлоатационих активности. Примена предложеног модела је показана на примеру енергетског трансформатора, за који је утврђена оптимална стратегија експлоатације. То значи да је, за дату концепцију напајања потрошача и усвојени (типски) дијаграм оптерећења, одређен редослед спровођења (примене) појединачних активности и мера у оквиру превентивног одржавања, ради минимизације укупних трошкова и штета, уз продужење животног века трансформатора и обезбеђење максималног нивоа поузданости. Разматране су комбинације различитих видова превентивног одржавања, набавке резервних делова и уградње система за континуални надзор појединих компоненти енергетских трансформатора. Са аспекта поузданости, енергетски трансформатор је представљен као редна веза шест функционалних целина. Неотказивост сваке компоненте је моделована мешавином експоненцијалне и *Weibull*-ове расподеле. Параметри расподела су израчунати на основу података из анкете коју је спровела референтна међународна организација CIGRE и која се сматра репрезентативном. При анализи појединих видова превентивног одржавања узете су обзир и суперпозиције кварова на планско одржавање.

Мере и активности које су анализирани су:

1. корективно одржавање,
2. једнодневно одржавање,
3. регенерација уља,

4. регенерација изолационог система,
5. ревитализација трансформатора,
6. уградња система за континуални надзор елемената енергетског трансформатора,
7. одређивање оптималне количине резервне опреме.

Анализе показују да се претходном применом одређених мера елиминише потреба спровођења осталих активности, чиме се остварују велике финансијске уштеде, без негативног утицаја на поузданост обављања предвиђене функције. Примера ради, употреба система за континуални надзор омогућава да се резервне компоненте купе знатно касније, при чему нема потребе набављати неке које се ређе кваре, а које имају високу набавну цену.

Такође, показано је да концепција напајања потрошача има веома велики утицај на обим и учестаност спровођења превентивног одржавања, чиме се оповргава досадашња пракса одржавања. Наиме, ако два елемента истог типа, старости и намене не раде у истим експлоатационим условима, нема основа да се превентивно одржавају на исти начин, већ се за сваки елемент мора направити посебан програм. Ако се има у виду број енергетских трансформатора у експлоатацији и њихова цена, очито је да трошкови непотребног одржавања имају милионску вредност.

Предложени модел је верификован у водећем међународном часопису категорије M21.

Ради потпуности модела, приказана је методологија којом се обухватају кварови узроковани временским непогодама. Ово може бити од значаја за неоклопљену опрему инсталисану на отвореном простору у подручјима са екстремним климатским условима.

На крају, предложени модел је реализован софтверски, ради избегавања било каквих непрецизности и грешака у прорачуну података.

7.2 Будућа истраживања

Могући правци даљих истраживања су:

- Развој динамичких модела за све типове скупе и важне електричне опреме у свим областима живота. Имајући у виду напредак технологије, јасно је да досадашњи стационарни модели губе на прецизности. Сходно томе, досадашњи концепти превентивног одржавања морају да се ревидирају. Развојем динамичких модела биће омогућено правовремено и јефтино спровођење потребног одржавања без икаквог негативног утицаја на захтевану поузданост разматраног типа опреме.
- У оквиру динамичких модела за сваки тип опреме посебну пажњу треба посветити условима експлоатације и утицају сваког чиниоца на поузданост рада. Важно је истаћи следећу чињеницу: ако имамо два елемента истог типа, старости и техничких карактеристика, они неће имати исту „техничку“ старост ако им се разликују амбијентални услови у којима се налазе, степен оптерећења и променљивост оптерећења (оптерећење може бити приближно константно, благо променљиво или изразито променљиво). Овде посебну пажњу треба посветити избору функције расподеле којима ће поједини утицајни фактори бити моделовани.

- Из спроведених анализа је очит позитиван утицај примене система за континуални надзор. Ако се има у виду да су коришћени улазни подаци о ефикасности ових система крајње песимистички, јасно је да ће се даљом анализом показати да стални надзор важних компоненти система може имати много већи утицај на поузданост и дужину очекиваног животног века. Продужењем животног века одлажу се инвестиције у набавку нове опреме, тако да је важност тачног моделовања рада система за континуални надзор евидентна. Пошто се ови системи базирају на интензивном коришћењу електронских компоненти, као неопходност се намеће коришћење наменских софтверских пакета праћених одговарајућом хардверском подршком.
- Код свих корисника крупне електричне опреме треба радити на едукацији и развијању свести о значају превентивног одржавања и правилном вођењу погонске статистике о догађајима који су се одиграли на појединим елементима. Досадашњу праксу треба ревидирати у смислу интензивнијег коришћења информационих технологија за ову намену, чиме ће бити омогућена детаљнија класификација догађаја по месту настанка, трајању отклањања и ефектима на стање система у целини. Такође, класификацију елемената треба извршити на што детаљнији начин (по старости, намени, условима на месту експлоатацији, степену оптерећења, итд).

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nahman J., Mijailović V.: Odabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, ISBN 86 - 7466 - 065 - 7, 2002, s. 302.
- [2] Nachlas J.: Fundamentals of Reliability Engineering, Class Notes, Department of Industrial and Systems Engineering, Virginia, Tech, Blacksburg, VA, 1995.
- [3] Nahman J., Mijailović V.: Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije, Akademska misao, Beograd, ISBN 978 - 86 - 7466 - 342 - 4, 2009, s. 231.
- [4] Endo F., Shiomi R., Suzuki Y., Kojima H., Hayakawa N. and Okubo H.: Optimization of asset maintenance strategies and power flow operation based on condition diagnoses, Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg, ISBN 978 - 0 - 620 - 44584 - 9, 2009, pp. 1 - 4.
- [5] McHaney P.: Understanding Computer Simulation, ISBN 978 - 87 - 7681 - 505 - 9, Ventus Publishing ApS, 2009, 172 p.
- [6] Abu - Taieh E. M. O., El Sheikh A. A. R: Handbook of Research on Discrete Event Simulation Environments: Technologies and Applications, Information Science Reference, Hershey - New York, ISBN 978 - 1 - 60566 - 774 - 4 (hardcover) - - ISBN 978 - 1 - 60566 - 775 - 1 (ebook), 2010, 585 p.
- [7] Layer E., Tomczyk K.: Measurements, Modelling and Simulation of Dynamic Systems, Cracow University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Poland, ISBN 978 - 3 - 642 - 04587 - 5, e - ISBN 978 - 3 - 642 - 04588 - 2, DOI 10.1007/978 - 3 - 642 - 04588 - 2, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 155 p.
- [8] <http://www.systemdynamics.org/> [Accessed: 10 - March - 2015]
- [9] Barlow R., L. Hunter: Optimum Preventive Maintenance with Repair, Operations Research, Vol.8, No.1, 1960, pp. 90 - 100.
- [10] Kowada M., Bando A.: Preventive Maintenance on a 1 - Unit System with Two Types of Repair, Microelectronics and Reliability, Vol. 22, No.2, 1982, pp. 287 - 293.
- [11] Guerts J.H.: Optimal Age Replacement versus Condition Based Replacement: Some Theoretical and Practical Considerations, Journal of Quality Technology, Vol.15, No.4, 1983, pp.171 - 179.
- [12] Nguyen D. G., Murthy D. N. P.: Optimal preventive maintenance policies for repairable systems, Operations Research 29, 1981, pp. 1181–1194.
- [13] Nakagawa T.: Periodic and sequential preventive maintenance policies, Journal of Applied Probability 23, 1986, 536–542.
- [14] Nakagawa T.: Sequential imperfect preventive maintenance policies, IEEE Transactions on Reliability 37, 1988, 295–298.
- [15] Lin D., Zuo M. J., Yam R. C. M.: General sequential imperfect preventive maintenance models, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering 7, 2000, pp. 253–266.
- [16] Lin D., Zuo M. J., Yam, R. C. M.: Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes, Naval Research Logistics 48, 2001, pp. 172–183.

- [17] Nakagawa T., Mizutani S.: A summary of maintenance policies for a finite interval, *Reliability Engineering and System Safety* 94, 2009, pp. 89–96.
- [18] Nahman J. M., Tubic D.: Optimal sparing strategy for substation components, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, 1991, pp. 633 - 639.
- [19] Nahman J. M., Tubic D.: Optimal sparing strategy for a group of substations, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, 1991, pp. 1469 - 1475.
- [20] Chowdhury A. A., Koval D. O.: Development of Probabilistic Models for Computing Optimal Distribution Substation Spare Transformers, *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 41, No. 6, 2005, pp. 1493 - 1498.
- [21] Wood A.: Availability Calculations with Exhaustible Spares, *IEEE Trans. on Reliability*, Vol.38, No.3, 1989, pp. 388 - 391.
- [22] Adams C. M.: Inventory Optimization Techniques, System vs. Item Level Inventory Analysis, *Reliability and Maintainability Symposium Proceeding*, 2004, pp. 55 - 60.
- [23] Yang S., Du Z.: Criticality Evaluation for Spare Parts Initial Provisioning, *Reliability and Maintainability Symposium Proceeding*, 2004, pp. 507 - 513.
- [24] Li W., Vaahedi E., Mansour Y.: Determining Number And Timing of Substation Spare Transformers Using A Probabilistic Cost Analysis Approach, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.14, No.3, 1999, pp. 934 - 939.
- [25] Nahman J. M., Tanaskovic M.R.: Probability Models for Optimal Sparing of Distribution Network Transformers, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.24 , No. 2, 2009, pp. 758 - 763.
- [26] Moghaddam K., Usher J.: Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming, *Computers & Industrial Engineering* Vol. 60, DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.021, 2011, pp. 654–665.
- [27] Okamura H., Dohi T., Osaki S.: A Dynamic Programming Approach for Sequential Preventive Maintenance Policies with Two Failure Modes, Publish in: *Reliability Modeling with Applications - Essays in Honor of Professor Toshio Nakagawa on his 70th Birthday*, World Scientific, ISBN: 978 - 981 - 4571 - 95 - 1, 2014, 380 p.
- [28] Smith C. L., Wood S. T.: Systems Analysis Programs for Hands - on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 8, Volume 1: Overview and Summary, *NUREG/CR - 7039*, Vol. 1, 2011, p. 74.
- [29] Liu H., Liu D., Liu Q.: Modeling Simulation Technology Research for Distribution Network Planning, *Energy and Power Engineering*, doi:10.4236/epe.2013.54B188, 2013, pp. 980 - 985.
- [30] Parmar K., Karena M. Parekh J.: Reliability assessment in IGMS using NEPLAN software, *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*, Vol. 1, Issue 12, 2014, ISSN (online): 2321 - 0613, pp. 2689 - 2692.
- [31] Proizvođački katalog ETAP Power Station Demo - Product Description/Overview, Operation Technology Inc., 1996 <http://www.etalp.com> [Accessed: 22 - September - 2015]
- [32] <http://www.prdcinfotech.com/> [Accessed: 22 - September - 2015]

- [33] <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products - systems - solutions/software - solutions/planning - data - management - software/planning - simulation/pages/pss - e.aspx> [Accessed: 22 - September - 2015]
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/RAMP_Simulation_Software_for_Modelling_Reliability,_Availability_and_Maintainability [Accessed: 22 - September - 2015]
- [35] Goel L., Gupta R.: A Windows - based Simulation Tool for Reliability Evaluation of Electricity Generating Capacity, Int. J. Engng Ed. Vol. 13, No. 5, 1997, pp. 347 - 357.
- [36] Goel L., Wong C.K., Wee G.S.: An educational software package for reliability evaluation of interconnected power systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.3, doi: 10.1109/59.466543, Aug 1995, pp.1147 - 1153.
- [37] Setreus J., Wallnerström C. J., Hilber P., Böös C., Göransson R.: RACalc: a Power Distribution Reliability Tool, 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010, IEEE , 2010, 154 - 159 p.
- [38] <http://vensim.com/> [Accessed: 20 - January - 2016]
- [39] Sourajit G. D.: Model of distributed software development using system dynamics, MSc Thesis, Iowa State University, 2015, 51 p.
- [40] Zio E.: Reliability engineering: Old problems and new challenges, Reliability Engineering and System Safety, Elsevier, 2009, 94, pp.125 - 141.
- [41] Dolćanin Ć., Osmokrović P., Pešić M., Stanković K.: Statističke metode u elektroenergetici, Akademska misao - Državni univerzitet u Novom Pazaru, ISBN 978 - 86 - 7466 - 355 - 4, 2009, 332 p.
- [42] Wang Y., Gong S., Grzybowski S.: Reliability Evaluation Method for Oil-Paper Insulation in Power Transformers, Energies, 2011, No. 4, doi:10.3390/en4091362, 2011, pp. 1362 - 1375.
- [43] Yang G.: Life Cycle Reliability Engineering, John Wiley & Sons, DOI: 10.1002/9780470117880, 2007, 544 p.
- [44] He Z., Wang Y., Li J., Gong S., Grzybowski.: New Mixed Weibull Probability Distribution Model for Reliability Evaluation of Paper - oil Insulation, Przegląd Electrptchniczny, ISSN 0033 - 2097, R. 89 NR 1a/2013, pp. 201 - 206.
- [45] Nakagawa T: Advanced Reliability Models and Maintenance Policies, Springer, ISBN: 9781848002937, 2008, 246 p.
- [46] Mahmoudi M., El Barkany A., El Khalfi A.: A Maintenance Optimization Policy for an Electric Power Distribution System: Case of the HV/MV Substations, Engineering, 2014, 6, pp. 236 - 253.
- [47] Gill P.: Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, CRC Press, ISBN: 1574446568, 2009, 961 p.
- [48] Kuo W., Zuo M. J.: Optimal Reliability Modeling: Principles and Application, John Wiley & Sons, ISBN 0 - 471 - 39761 - X, 2003, 544 p.
- [49] Ge H.: Maintenance Optimization for Substations with Aging Equipment, PhD thesis, University of Nabraska -Linkoln, 2010, 194 p.
- [50] Adefarati T., Kayode Babarinde A., Sunday Oluwole A., Olusuyi K.: Reliability Evaluation of Ayede 330/132KV Substation, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 4, Issue 4, October 2014, mpp. 87 - 91.

- [51] Nourbakhsh G.: Reliability analysis and economic equipment replacement appraisal for substation and sub - transmission systems with explicit inclusion of non - repairable failures, PhD thesis, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2011, 260 p.
- [52] van Schijndel A., Wouters P. A. A. F., Steennis E. F., Wetzer J. M.: Approach for an integral power transformer reliability model, European Transactions On Electrical Power, vol. 22, 2011, DOI : 10.1002/etep.578, 2012, pp. 491 - 503.
- [53] Jongen R. A., Morshuis P. H. F., Smit J. J., Janssen A. L. J., Gulski E.: Statistical analysis of in service failed epoxy resin bushings in a 50kV switchgear assembly. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City (USA), October 2006, pp. 469–472.
- [54] van Schijndel A., Wetzer J. M., Wouters P.A. A. F.: Reliability estimation of paper insulated components, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vancouver (Canada), October 2007, pp. 17–20.
- [55] Woodcock D. J.: The key to condition - based asset strategies for power transformers, Weidmann Annual Technical Conference, 2002.
- [56] IEC 60076 - 7. Power transformers - Part 7: Loading guide for oil - immersed power transformers, 2005.
- [57] IEEE C57.91 - 1995. IEEE guide for loading mineral - oil - immersed transformers, 1996.
- [58] van Schijndel A., Wetzer J. M., Wouters P. A. A. F.: Forecasting transformer reliability, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City (USA), October 2006, pp. 577–582.
- [59] Wouters P. A. A. F., van Schijndel A., Wetzer J.M.: Remaining lifetime modelling of power transformers on individual and population level, 10th International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam (Germany), DOI:10.1109/ICSD.2010.5568112, 2010, pp. 577–580.
- [60] van Schijndel A.: Power transformer reliability modelling. Dissertation, Eindhoven University of Technology, June 2010.
- [61] Jongen R. A., Gulski E., Morshuis P. H. F., Smit J. J., Janssen A. L. J.: Statistical analysis of power transformer component life time data. 8th International Power Engineering Conference, Singapore, 2007.
- [62] van Schijndel A., Wetzer J. M., Wouters P. A. A. F.: Remaining lifetime modelling for replacement of power transformer populations. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing (China), 2008, pp. 597–600.
- [63] Ristic O., Mijailovic V.: Method for determining optimal power transformers exploitation strategy, International journal: Electric Power Systems Research, Volume 83, Issue 1, February 2012, doi:10.1016/j.eprsr.2011.09.007, ISSN: 0378 - 7796, pp. 255 - 261.
- [64] Mijailovic V.: Method for Effects Evaluation of Some Forms of Power Transformers Preventive Maintenance, EPSR, Vol. 78, 2008, pp.765 - 776.
- [65] Mijailovic V.: Optimal spares availability strategy for power transformer components, EPSR, Vol. 80, 2010, pp. 987 - 992.

- [66] Tenbohlen S. et al.: Experience - based evaluation of economic benefits of on - line monitoring systems for power transformers, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12 - 110.
- [67] Tang S., Hale C., Thaker H: Reliability modeling of power transformers with maintenance outage, Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal, Taylor & Francis, Vol. 2, 2014, pp. 316–324.
- [68] Li Y., Tang M. J., Wu F. J., Zhang G. J., Wang S. H., Suwarno: Aging Assessment of Power Transformer Using Multi - parameters, International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 5, Number 1, March 2013, pp. 34 - 44.
- [69] Ribeiro L., Barata J., Silvério N.: A High Level E - Maintenance Architecture to Support on - site Teams, Enterprise and Work Innovation Studies, 4, IET, 2008, pp. 129 - 138.
- [70] Maintenance Scheduler for Circuit Breakers and Power Transformers, Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, 2006, 223 p.
- [71] Bian, J.P., Sun X, Wang M., Zheng H., Xing H.: Probabilistic Analysis of Life Cycle Cost for Power Transformer, Journal of Power and Energy Engineering, 2, 2014, pp. 489 - 494. <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24066> [Accessed: 1 - September - 2015]
- [72] Billinton R., Li W.: Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Springer Science+Business Media, New York, ISBN 978 - 1 - 4899 - 1346 - 3, 1994, 351 p.
- [73] Singh V. P.: System modelling and Simulation, Institute of Engineering and Technologies Bhaddal Ropar, India, New Age International, ISBN (13) : 978 - 81 - 224 - 2924 - 4, 2009, 247 p.
- [74] Korn G. A.: Interactive Dynamic System Symulation, CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, ISBN 978 - 1 - 4398 - 3641 - 5, 2011, 196 p.
- [75] Robinson S: Simulation: The practice of Model Development and Use, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0 - 470 - 84772 - 7, 2004, 316 p.
- [76] Sokolowski J. A., Banks C.: Handbook of Real World Applications in Modelling and Simulation, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978 - 1 - 118 - 11777 - 4, 2012, 331 p.
- [77] Tripathi A., Sisodia C.: Comparative Study of Reliability Assessment Techniques for Composite Power System Planning & Applications, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248 - 9622, Rustamji Institute of Technology, 2014, pp. 8 - 13.
- [78] Goodrich M., Tamassia R., Goldwasser M.: Data Structures and Algorithms in Java, JohnWiley & Sons, Inc, ISBN: 978 - 1 - 118 - 77133 - 4, 2014, 720 p.
- [79] Mijailović V.: Optimalne lokacije rasklopne opreme u distributivnim mrežama različitih koncepcija napajanja potrošača, Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", 2011, c. 269 - 281.
- [80] Sokolowski J. A., Banks C. M.: Principles of Modeling and Simulation - A Multidisciplinary Approach, The Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center, Old Dominion University Norfolk, A John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978 - 0 - 470 - 28943 - 3, 2009, 259 p.

- [81] Faulin J., Juan A. A., Martorell S., Ramírez - Márquez J. E.: *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*, Springer, ISSN 1614 - 7839, ISBN 978 - 1 - 84882 - 212 - 2, DOI 10.1007/978 - 1 - 84882 - 213 - 9, 2010, 315 p.
- [82] Supriya M. D., Reddy Atla C. S., Mohan K. R., Vasanth Kumara T. M.: *Distribution System Reliability Evaluation using Time Sequential Monte Carlo Simulation*, ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering (ITSI - TEEE), ISSN (PRINT) : 2320 - 8945, Volume 2, Issue 1, 2014, pp. 24 - 32.
- [83] Chowdhury A., Koval D. O.: *Power distribution system reliability - Practical methods and applications*, John Wiley & Sons, ISBN: 978 - 0 - 470 - 29228 - 0, 2009, 560 p.
- [84] Haakana J., Kaipia T., Lassila J., Partanen J.: *Simulation method for evaluation of the challenges in the reliability performance of medium - voltage networks*, 17th Power Systems Computation Conference, 2011, Stockholm, Sweden.
- [85] Brown R.: *Electric power distribution reliability*, CRC Press, ISBN 13: 978 - 0 - 8493 - 7567 - 5, 2009, 453 p.
- [86] Hartmann A. K.: *Big practical guide to computer simulation*, University of Oldenburg, Germany, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014, 462 p.
- [87] Zhu D.: *Electric Distribution Reliability Analysis Considering Time - varying Load, Weather Conditions and Reconfiguration with Distributed Generation*, PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007, 155 p.
- [88] Ewald R.: *Automatic Algorithm Selection for Complex Simulation Problems*, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978 - 3 - 8348 - 1542 - 2, 2012, 382 p.
- [89] Liu N., Zhou B., Lin B., Zhu L., Liu M.: *An Adequacy Evaluation Model for Power System*, *Telkomnika*, Vol. 11, No. 12, December 2013, e - ISSN: 2087 - 278X, pp. 7793 - 7800.
- [90] Edimu M.: *Using Probability Density Functions to Analyze the Effect of External Threats on the Reliability of a South African Power Grid*, PhD Thesis, University of Cape Town, Faculty of Engineering and Built Environment, Department of Electrical Engineering, 2013, p. 205.
- [91] AlAli D., Griffiths H., Cipcigan L. M., Haddad A.: *Assessment of line overloading risk for transmission networks*, 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2015 p. 015 (6).
- [92] Nutarp J.: *Building Software for Simulation: Theory And Algorithms, with Application in C++*, John Wiley & Sons, Inc., 2011, 347 p.
- [93] Sharma P.: *Discrete - Event Simulation*, *International journal of scientific & technology research* volume 4, issue 04, ISSN 2277 - 8616, 2015, pp. 136 - 140.
- [94] Macal C. M.: *To Agent - Based Simulation from System Dynamics*, In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 5 - 8 Dec 2010, Baltimore, MD, USA. IEEE Computer Society, ISBN 978 - 1 - 4244 - 9864 - 2, 2010, pp. 371 - 382.
- [95] Macal C. M., North M. J.: *Introductory Tutorial: Agent - Based Modeling and Simulation*, In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 8 - 11 December 2013, Washington, USA. IEEE Computer Society, ISBN 978 - 1 - 4799 - 2076 - 1, 2013, pp. 262 - 376.
- [96] Sterman J.: *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irvin - McGraw Hill Higher Education, ISBN 0 - 07 - 231135 - 5, 2000, 982 p.

- [97] Kremers E.: Modelling and Simulation of Electrical Energy Systems through a Complex Systems Approach using Agent-Based Models, PhD, KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-86644-946-6, 2013, 176 p.
- [98] Basirat P., Fazlollahtabar H., Mahdavi I.: System dynamics meta - modelling for reliability considerations in maintenance, Int. J. Process Management and Benchmarking, Vol. 3, No. 2, 2013, pp.136–153.
- [99] Mkandawire B., Mutatina Ijumba N., Whitehead H.: Asset Management Optimization Through Integrated Systems Thinking and N - 1 Contingency Capability for Refurbishment, IEEE Systems Journal 5(3), 2011, pp. 321 - 331.
- [100] Chumai R.: System Dynamic Modeling of Plant Maintenance Strategy in Thailand, The 27th International Conference of the System Dynamics Society Albuquerque, New Mexico, USA, ISBN 978 - 1 - 935056 - 03 - 04, 2009, pp. 1 - 16.
- [101] Kishori Sharan: Beginning Java 8 APIs, Extensions and Libraries Swing, JavaFX, JavaScript, JDBC and Network Programming APIs, Apress, ISBN: 978 - 1 - 4302 - 6661 - 7, 2014, 808 p.
- [102] Spell B.: Pro Java 8 Programming, 3rd Edition, Apress, ISBN: 978 - 1 - 484206 - 42 - 3, 2014, 708 p.
- [103] <http://www.jfree.org/jfreechart/> [Accessed: 11 - February - 2016]
- [104] Velten K.: Mathematical Modeling and Simulation - Introduction for Scientists and Engineers, Strauss GmbH, Morlenbach, ISBN: 978 - 3 - 527 - 40758 - 8, 2009, 305 p.
- [105] Abdel Fattah K. M. M., Loredana C., Marco F.: FMECA analysis for the assessing of maintenance activity for power transformers, Proceedings of Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM), Imprensa da Universidade de Coimbra, DOI:[http://dx.doi.org/10.14195/978 - 972 - 8954 - 42 - 04](http://dx.doi.org/10.14195/978-972-8954-42-04), ISBN 978 - 972 - 8954 - 42 - 0, 2014, pp. 21 - 26. Available at: <http://hdl.handle.net/10316.2/33313> [Accessed: 30 - March - 2016]