



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Милета Д. Жарковић

МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА  
РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА НА  
БАЗИ ФАЗИ МОДЕЛА СТАЊА  
ВИСОКОНАПОНСКЕ ОПРЕМЕ

-докторска дисертација-

Београд, 2017.



UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Mileta D. Žarković

**MONITORING AND DIAGNOSTICS  
OF SUBSTATION BASED ON FUZZY  
MODEL OF HIGH VOLTAGE  
EQUIPMENT CONDITION**

-Doctoral Dissertation-

Belgrade, 2017

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

### Ментор:

Др Златан Стојковић, редовни професор  
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

### Чланови комисије:

Др Златан Стојковић, редовни професор  
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Др Јован Микуловић, ванредни професор  
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Др Александар Ранковић, ванредни професор  
(Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука у Чачку)

Др Александар Ракић, ванредни професор  
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Др Жељко Ђуришић, доцент  
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Датум усмене одбране: \_\_\_\_\_

# МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА НА БАЗИ ФАЗИ МОДЕЛА СТАЊА ВИСОКОНАПОНСКЕ ОПРЕМЕ

## Резиме

Непрекидност напајања потрошача у електроенергетском сектору је један од примарних услова поузданог рада електроенергетског система (ЕЕС). Поуздано и квалитетно снабдевање електричном енергијом представља основни захтев који пред ЕЕС постављају потрошачи електричне енергије. На поузданост рада ЕЕС-а у знатној мери утиче стање опреме у високонапонским разводним постројењима. Карактеристике високонапонске опреме се током експлоатације неповратно мењају услед већег броја фактора и услед тога повећавају губитке електричне енергије, време прекида рада ЕЕС-а и ризик од хаварије скупе електроенергетске опреме. Процена стања високонапонске опреме може се извршити на основу великог броја развијених метода које су базиране, како на мерењима у погону (*on-line* методе), тако и на мерењима у лабораторији (*off-line* методе). Најчешћа испитивања високонапонске опреме, чији се резултати разматрају, јесу: термографска испитивања, хроматографска испитивања (*dissolved gas analysis – DGA*), испитивања у фреквенцијском домену (*frequency response analysis – FRA*), праћење температуре, броја и времена трајања операција опреме и друго. Због својих улога у високонапонском постројењу мониторинг и дијагностика стања прекидача, растављача, енергетских и мерних трансформатора су обрађени у великом броју научноистраживачких радова и националних и међународних стандарда. Велики број развијених метода за мониторинг и дијагностику стања високонапонске опреме се везује за резултате само једне методе мерења и испитивања. Мали број радова се бави прорачуном поузданости разводног постројења на бази тренутног стања опреме. Недостаци метода се јављају због несагледавања целокупног стања високонапонске опреме и неизвесности резултата мерних испитивања и података у прорачуну поузданости.

У оквиру ове докторске дисертације дат је преглед стандарда и савремених метода, на бази вештачке интелигенције, за мониторинг и дијагностику стања прекидача, растављача, енергетског и мерног трансформатора у високонапонском постројењу. У дисертацији су разматране савремене методе прорачуна

поузданости разводног постројења и доношења одлуке у вези са одржавањем, ревитализацијом и заменом високонапонске опреме. Такође је развијена и нова метода за мониторинг и дијагностику разводног постројења којом се омогућава коришћење великог броја различитих података добијених током експлоатације високонапонске опреме. Новоразвијена метода се базира на примени фази теорије из домена вештачке интелигенције. Резултати методе су примењени кроз мапу ризика и индекс перформансе система за доношење одлуке у вези са одржавањем и реконфигурацијом разводног постројења.

Основна претпоставка је да се на основу реалних мерних података из различитих метода испитивања, снимљених у разводном постројењу, применом вештачке интелигенције, могу одредити показатељи стања високонапонске опреме. На основу таквих показатеља и базе података о испитивању високонапонске опреме могуће је прорачунати поузданост целог разводног постројења. Такође, на основу таквог прорачуна могуће је донети одлуку о приоритету за ремонт или ревитализацију појединих делова разводног постројења. Друга битна претпоставка је да се предности фази логике из домена вештачке интелигенције могу искористити за превазилажење одређених недостатака који настају услед обједињавања резултата различитих мерних метода и неизвесности, несигурности мерних података. База за развијање нове методе јесте термографско *on-line* испитивање којим се може проценити развој квара и правовремено спречити прекид рада. Новоразвијеном методом се применом фази логике формирају адекватни фази експертски системи који ће указивати на вероватноћу квара, тј. хитност интервенције, код високонапонске опреме. Такви фази експертски системи представљају фази моделе стања прекидача, растављача, енергетских и мерних трансформатора. Резултате фази експертских система могуће је употребити за прорачун поузданости високонапонског постројења на бази тренутног стања опреме. Новитет у модификованој методи за прорачун поузданости јесте естимација фази бројева из великог броја података, чиме се уводи неизвесност и неодређеност прорачуна. Сви фази експертски системи, модификована метода за прорачун поузданости и доношење одлуке су развијени у програмском пакету MATLAB. Тако развијена

метода је тестирана за реалне податке преузете од ЈП „Електромрежа Србије“ и ЈП „Електропривреда Србије“.

Развијене методе и алгоритми у оквиру ове докторске дисертације су применљиви у привреди у процесу мониторинга и дијагностике стања разводних постројења у погону. Новоразвијену методу је могуће имплементирати у виду софтвера који би користио постојеће базе података и актуелна мерења добијена у оквиру испитивања високонапонске опреме разводног постројења. Овакав софтвер би олакшао доношење одлука о даљој експлоатацији високонапонске опреме разводног постројења и спречио дуготрајне кварове и прекиде напајања потрошача.

**Кључне речи:** мониторинг и дијагностика високонапонске опреме, поузданост, фази теорија, одржавање разводног постројења.

**Научна област:** Техничке науке – Електротехника

**Ужа научна област:** Електроенергетски системи

**УДК:** 621.3

# MONITORING AND DIAGNOSTICS OF SUBSTATION BASED ON FUZZY MODEL OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT CONDITION

## Abstract

The continuity of supplying consumers in the electricity power sector is one of the primary conditions for the reliable operation of the electric power system (EPS). Reliable and high-quality electricity supply is a basic consumers requirement for EPS. The condition of the equipment in the high voltage substation have significantly influence on the reliability of EPS. Characteristics of high voltage equipment during operation irreversibly changed due to a number of factors and as a result increase the losses and downtime of EPS, and the risk of accidents expensive power equipment. The assessment of the state of high-voltage equipment can be done based on a large number of developed on-line measurements and laboratory measurements (off-line methods). The most common high-voltage equipment tests, whose results are discussed are: thermographic tests, chromatographic tests (dissolved gas analysis – DGA), frequency response analysis – FRA, temperature monitoring, number and duration of operations and other. Because of its role in high voltage substations, monitoring and diagnosis of circuit breakers, disconnectors, power and measurement transformers has presented in a lot of scientific research papers, national and international standards. A lot of developed methods for monitoring and diagnosing the condition of high voltage equipment are related to the results of only one measurement and testing method. A small number of works deal with the reliability calculation of the substation based on the current condition of the equipment. Disadvantages of the exsisting methods occur due to the non-observation of the overall state of the high voltage equipment and the uncertainty of the results of measurement tests and data in the reliability calculation.

As part of this doctoral thesis provides an overview of the standards and modern methods based on artificial intelligence for monitoring the condition of the circuit breakers, disconnectors, power and measurement transformers in high voltage substations. The dissertation examined the modern methodsfor reliability calculation of the substations and the decision-making related to the maintenance, revitalization and replacement of high-voltage equipment. A new method for monitoring and diagnostics of the substation has been developed. A new method enables the use of a large number

of different data obtained during the exploitation of high-voltage equipment. The newly developed method is based on the application of the fuzzy theory in the domain of artificial intelligence. The results of the method were applied through the risk map and the system performance index for the decision-making related to the maintenance and reconfiguration of the substation.

The basic assumption is that the real recorded measurement data from different test methods can be used to determine indicators of the state of high-voltage equipment using artificial intelligence. On the basis of such indicators and databases on the testing of high-voltage equipment it is possible to calculate the reliability of the entire substation. Also, based on such a calculation it is possible to decide on the priority for overhaul or revitalization of substation parts. Another important assumption is that the advantages of fuzzy logic in the domain of artificial intelligence can be used to overcome some of the deficiencies that result from integration of results of different measuring methods and the uncertainty of measurement data. The basis for the development of a new method is a thermographic on-line scanning that can evaluate the development of faults and prevent the interruption of work. The new developed method use fuzzy theory to form fuzzy expert systems that will indicate the probability of failure, i.e. emergency intervention, of high-voltage equipment. Such expert systems represent the fuzzy model of the circuit breakers, disconnectors, power and measurement transformers. The results of the expert systems can be used to calculate the reliability of a high voltage substation based on the current state of the equipment. A novelty in a modified reliability calculation method is the estimation of the fuzzy numbers from a large number of data, which introduces the uncertainty into calculation. All fuzzy expert systems, a modified method for calculating reliability and decision making are developed in the MATLAB software package. The developed method was tested for real data taken from PE „Elektromreža Srbije“ and PE „Elektroprivreda Srbije“.

The developed methods and algorithms in this doctoral dissertation are applicable in the energy economy in the process of monitoring and diagnostics of substation as part of EPS. The new developed method can be implemented in the form of software that would use the existing databases and current measurements obtained during testing of the high voltage equipment of the substations. Such software would



contribute to making decisions about the further exploitation of the high-voltage equipment of the EPS and to prevent long-term malfunctions and discontinues of the supply of consumers.

**Keywords:** high voltage equipment monitoring and diagnostics, reliability, fuzzy theory, substation asset management.

**Scientific field:** Technical science – Electrical engineering

**Specific scientific field:** Power systems

**UDK:** 621.3

## САДРЖАЈ

1. УВОД .....	1
2. МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА .....	6
2.1. Уводна разматрања .....	6
2.2. Енергетски трансформатор .....	9
2.3. Мерни трансформатор .....	23
2.4. Прекидач .....	26
2.5. Растављач .....	32
3. МЕТОДА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ СТАЊА ВИСОКОНАПОНСКЕ ОПРЕМЕ НА БАЗИ ФАЗИ ТЕОРИЈЕ .....	37
3.1. Опис и алгоритам методе .....	37
3.2. Фазни експертски систем за енергетски трансформатор .....	39
3.3. Фазни експертски систем за мерни трансформатор.....	57
3.4. Фазни експертски систем за прекидач .....	60
3.5. Фазни експертски систем за растављач.....	69
4. МЕТОДА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ И ОДРЖАВАЊЕ РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА НА БАЗИ ФАЗИ ТЕОРИЈЕ .....	73
4.1. Уводна разматрања .....	73
4.2. Метода минималних пресека .....	74
4.3. Примена фазне теорије код прорачуна поузданости.....	78
4.4. Мапа ризика и индекс перформанси система.....	82
5. РАЧУНАРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ.....	88
5.1. Уводна разматрања .....	88
5.2. Аутоматизација дијагностике стања високонапонске опреме.....	88
5.2.1 Анализа рада експертских система за дијагностику ЕТ-а.....	88
5.2.2 Валидација рада експертских система за дијагностику ЕТ-а.....	92
5.2.3 Тестирање рада експертских система за дијагностику прекидача, растављача и струјног мерног трансформатора.....	93
5.3. Аутоматизација дијагностике и доношења одлуке о одржавању разводног постројења.....	95
6. ЗАКЉУЧАК .....	102
ЛИТЕРАТУРА .....	105
ПРИЛОЗИ.....	113

Прилог 1 – Фази теорија.....	114
Фази скупови .....	116
Фази бројеви .....	120
Прилог 2 – Табеле база правила .....	133

## ЛИСТА СЛИКА

Сл. 2.1.1 Утицај одржавања високонапонске опреме са и без мониторинга на интензитет кварова [1] .....	7
Сл. 2.2.1 Промена отпорности сва три фазна намотаја у зависности од положаја регулационе преклопке [52] .....	16
Сл. 2.2.2 Промена амплитуде преносне функције сва три фазна намотаја у зависности од фреквенције [52] .....	18
Сл. 2.4.1 Снимљена крива ходограма при затварању контаката [35].....	31
Сл. 2.5.1 Крива $\theta = f(t)$ [44].....	33
Сл. 2.5.2 Крива $\theta = f(t)$ са прескоком угла ротације [44] .....	34
Сл. 2.5.3 Зависност струје мотора растављача од времена [44].....	35
. Сл. 3.1.1 Алгоритам методе за дијагностику стања и анализу поузданости на бази фази теорије .....	37
Сл. 3.1.2 Алгоритам примене фази теорије код методе за дијагностику стања опреме .....	38
Сл. 3.2.1 Експертски систем ЕТ-а са пет фази експертских подсистема .....	40
Сл. 3.2.2 Фази експертски подсистем за термографију ЕТ-а са својим улазима .....	40
Сл. 3.2.3 Функције припадности за улаз век ЕТ-а.....	42
Сл. 3.2.4 Функције припадности за улаз $T$ изолације ЕТ-а .....	42
Сл. 3.2.5 Функције припадности за улаз $\theta_{\text{претходна}}$ .....	42
Сл. 3.2.6 Функције припадности за улаз $\theta$ .....	43
Сл. 3.2.7 Функције припадности за излаз фази подсистема за термографију ЕТ-а .....	43
Сл. 3.2.8 Зависност излаза од животног века и претходне температуре прегревања, за $\theta=25\text{ }^\circ\text{C}$ и $T=115\text{ }^\circ\text{C}$ .....	45
Сл. 3.2.9 Зависност излаза од животног века и актуелне температуре прегревања, за $\theta_{\text{претходно}}=5\text{ }^\circ\text{C}$ и $T=100\text{ }^\circ\text{C}$ .....	45
Сл. 3.2.10 Фази експертски подсистем за електричне особине намотаја ЕТ-а са својим улазима .....	46
Сл. 3.2.11 Функције припадности за улаз $IP$ .....	47
Сл. 3.2.12 Функције припадности за улаз $tg\delta_{\text{нам}}$ .....	47
Сл. 3.2.13 Функције припадности за улаз $\max(dR_{Cu})$ .....	47
Сл. 3.2.14 Функције припадности за излаз фази експертских подсистема који се односе на електричне особине намотаја и проводних изолатора ЕТ-а .....	48

Сл. 3.2.15 Фази експертски подсистем за електричне особине проводних изолатора ЕТ-а са својим улазима .....	48
Сл. 3.2.16 Функције припадности за улаз $\max(tg\delta_{nu})$ .....	49
Сл. 3.2.17 Фази експертски подсистем за механичке особине намотаја ЕТ-а са својим улазима .....	49
Сл. 3.2.18 Функције припадности за улаз $I_o$ .....	50
Сл. 3.2.19 Функције припадности за улаз $L\gamma$ .....	50
Сл. 3.2.20 Функције припадности за улаз $ASLE$ .....	51
Сл. 3.2.21 Функције припадности за улаз $CC$ .....	51
Сл. 3.2.22 Функције припадности за улаз $DABS$ .....	51
Сл. 3.2.23 Функције припадности за излаз фази подсистема за механичке особине намотаја ЕТ-а .....	52
Сл. 3.2.24 Фази експертски подсистем за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а са својим улазима .....	52
Сл. 3.2.25 Функције припадности за улаз $X$ .....	53
Сл. 3.2.26 Функције припадности за улаз $Y$ .....	53
Сл. 3.2.27 Функције припадности за улаз $Z$ .....	54
Сл. 3.2.28 Функције припадности за улаз $Sp$ .....	54
Сл. 3.2.29 Функције припадности за улаз $tg\delta_{y\delta}$ .....	54
Сл. 3.2.30 Функције припадности за излаз фази подсистема за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а .....	55
Сл. 3.2.31 Фази експертски систем за ЕТ са <i>Mamdani</i> типом закључивања.....	55
Сл. 3.3.1 Фази експертски систем за СМТ .....	58
Сл. 3.3.2 Функције припадности за улаз $\Delta i$ експертског система СМТ-а.....	59
Сл. 3.3.3 Функције припадности за улаз $\Delta\phi$ експертског система СМТ-а.....	59
Сл. 3.4.1 Експертски систем прекидача са трима фази експертским подсистемима.....	60
Сл. 3.4.2 Фази експертски подсистем за дијагностику контаката прекидача.....	61
Сл. 3.4.3 Функције припадности за максимални број операција .....	62
Сл. 3.4.4 Функције припадности за суму квадрата струја искључења свих кратких спојева .....	62
Сл. 3.4.5 Функције припадности за одступање контактне отпорности по фазама .....	62
Сл. 3.4.6 Фази експертски подсистем за дијагностику коморе и медијума за гашење електричног лука код прекидача.....	63
Сл. 3.4.7 Функције припадности за температуру гаса .....	64

Сл. 3.4.8	Функције припадности за дозвољено цурење гаса.....	64
Сл. 3.4.9	Функције припадности за притисак гаса .....	64
Сл. 3.4.10	Функције припадности за густину гаса .....	65
Сл. 3.4.11	Функције припадности излаза фази експертског подсистема за дијагностику коморе и медијума за гашење електричног лука код прекидача.....	65
Сл. 3.4.12	Фази експертски подсистем за дијагностику погонског механизма прекидача.....	66
Сл. 3.4.13	Функције припадности за брзину контаката прекидача .....	67
Сл. 3.4.14	Функције припадности за удаљеност контаката прекидача .....	67
Сл. 3.4.15	Функције припадности за време реаговања контаката прекидача.....	68
Сл. 3.4.16	Функције припадности за дозвољено време расипања између полова прекидача.....	68
Сл. 3.4.17	Фазификација излаза фази експертског подсистема за погонски механизам прекидача .....	68
Сл. 3.5.1	Експертски систем растављача са два фази експертска подсистема .....	69
Сл. 3.5.2	Фази експертски подсистем за дијагностику контаката прекидача.....	69
Сл. 3.5.3	Фази експертски подсистем за дијагностику покретних делова растављача.....	70
Сл. 3.5.4	Функције припадности за разлику угла ротације покретних делова растављача.....	71
Сл. 3.5.5	Функције припадности за пораст струје мотора растављача .....	71
Сл. 3.5.6	Функције припадности за разлику времена операције новог растављача и растављача у експлоатацији.....	72
Сл. 4.2.1	Еквивалентна Н заменска шема разводног постројења и б) Еквивалентни граф .....	75
Сл. 4.3.1	Интензитет квара у форми фази броја .....	80
Сл. 4.3.2	Функције припадности интензитета квара за: трансформатор (ET), струјни мерни трансформатор (SMT), прекидач (PRE) и растављач (RAS).....	80
Сл. 4.3.3	Функције припадности времена отклањања квара за: трансформатор (ET), струјни мерни трансформатор (SMT), прекидач (PRE) и растављач (RAS) .....	81
Сл. 4.3.4	Цена електричне енергије у облику фази броја .....	81
Сл. 4.4.1	Одређивање приоритета замене и реконструкције опреме [34].....	83
Сл. 4.4.2	Мапа ризика дефинисана на бази индекса здравља енергетског трансформатора [48].....	84
Сл. 4.4.3	Мапа ризика са назначеним нивоима ризичног стања енергетског трансформатора [50] .....	84
Сл. 4.4.4	Мапа ризика са назначеним нивоима критичности [39] .....	85

Сл. 4.4.5 Мапа ризика са примерима растављача и ЕТ-а .....	86
Сл. 5.2.1 Термографске слике четири испитавана ЕТ-а: а) 110/ 35 kV/ kV, б) 220/ 110 kV/ kV, ц) 400/ 220 kV/ kV и д) 400/ 110 kV/ kV .....	89
Сл. 5.3.1 Индекс значаја у форми фази броја .....	96
Сл. 5.3.2 Мапа ризика коришћена у сврху доношења одлуке о приоритету одржавања високонапонске опреме.....	97
Сл. 5.3.3 Мапа ризика коришћена у сврху доношења одлуке о приоритету одржавања делова постројења.....	99
Сл. 5.3.4 Илустрација шеме разводног постројења према потреби за одржавањем.....	100
Сл. П1. 0.1 стинитост одређене тврдње у фази логици	115
Сл. П1. 0.2 Скуп <b>A</b> и елементи <i>x</i> и <i>y</i> .....	116
Сл. П1. 0.3 Фази скуп <b>A</b> и елементи <i>x</i> , <i>y</i> и <i>z</i> .....	117
Сл. П1. 0.4 Фази скуп са назначеним терминима: <i>support</i> , <i>height</i> , <i>ker</i> и $A_\alpha$ .....	118
Сл. П1. 0.5 Графички приказ особина класичних скупова који важе и за фази скупове.....	119
Сл. П1. 0.6 Фази број <i>T</i> и одговарајући интервал поверења за степен припадности $\alpha=0,5$ .....	120
Сл. П1. 0.7 Функција припадности фази броја <b>A</b> .....	122
Сл. П1. 0.8 Функција припадности трапезоидалног фази броја $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ .....	123
Сл. П1. 0.9 Шематски приказ екпертског система .....	125
Сл. П1. 0.10 Илустрација <i>Mamdani</i> система закључивања са методом одсецања .....	128
Сл. П1. 0.11 Илустрација <i>Mamdani</i> система закључивања са методом скалирања .....	129
Сл. П1. 0.12 Илустрација Графичка презентација метода дефазификације .....	130
Сл. П1. 0.13 Илустрација процеса инференције за <i>Sugeno</i> систем закључивања .....	131
Сл. П1. 0.14 Излазно решење пре дефазификације (резултат агрегације) са означеним вредностима које се добијају као њен резултат.....	132

## ЛИСТА ТАБЕЛА

Таб. 2.2.1 Оријентационе граничне вредности $R_{60''}$ намотаја ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16] .....	12
Таб. 2.2.2 Оријентационе граничне вредности $IP$ за различита стања ЕТ-а [16] .....	13
Таб. 2.2.3 Оријентационе граничне вредности $tg\delta$ намотаја ( $tg\delta_{нам}$ ) ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16] .....	14
Таб. 2.2.4 Препоручене максималне вредности $tg\delta$ проводних изолатора ( $tg\delta_{ну}$ ) ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16] .....	14
Таб. 2.2.5 Препоручене вредности $tg\delta$ трансформаторског уља ( $tg\delta_{уља}$ ) ЕТ-а код дијагностиковања стања уља [16] .....	15
Таб. 2.2.6 Граничне вредности максималне релативне међуфазне разлике отпорности намотаја за различита стања ЕТ-а [52] .....	16
Таб. 2.2.7 Критеријуми за оцену стања ЕТ-а на бази DGA резултата.....	21
Таб. 2.2.8 Оријентационе граничне вредности $Cp$ за различита стања ЕТ-а [16] .....	22
Таб. 2.3.1 Референтне вредности отпорности ( $R_{60''}$ ) изолације СМТ-а и НМТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а.....	24
Таб. 2.3.2 Оријентационе граничне вредности $IP$ за различита стања СМТ-а и НМТ-а.....	24
Таб. 2.3.3 Оријентационе граничне вредности $tg\delta$ намотаја ( $tg\delta_{нам}$ ) СМТ-а и НМТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а .....	25
Таб. 2.3.4 Граничне вредности струјне и фазне грешке НМТ-а у зависности од класе тачности НМТ-а.....	25
Таб. 2.3.5 Граничне вредности струјне, $\Delta i$ , и фазне, $\Delta\varphi$ , грешке СМТ-а у зависности од класе и примене СМТ-а .....	26
Таб. 2.4.1 Оријентационе граничне вредности параметара који су коришћени за одређивање стања прекидача .....	32
Таб. 2.5.1 Збирни приказ расподеле топлих места по опреми и години испитивања разводних постројења у оквиру ЈП ЕМС .....	35
Таб. 2.5.2 Распоред поновљених топлих места по апаратима, напонском нивоу и години испитивања .....	35
Таб. 3.2.1 База правила за фази експертски подсистем за термографију ЕТ-а.....	44
Таб. 4.2.1 Несигурни чворови посматраног разводног постројења.....	76
Таб. 4.3.1 Време отклањања квара код различитих уређаја [66] .....	80
Таб. 5.2.1 Улазни подаци за четири испитивана ЕТ-а различитих напонских нивоа .....	90



Таб. 5.2.2 Резултати дијагностике за четири испитивана ЕТ-а различитих напонских нивоа .....	91
Таб. 5.2.3 Поређење и валидација резултата дијагностике ЕТ-а .....	93
Таб. 5.2.4 Улазни подаци и резултати дијагностике три СМТ-а .....	94
Таб. 5.2.5 Улазни подаци и резултати дијагностике три растављача.....	94
Таб. 5.2.6 Улазни подаци и резултати дијагностике трију прекидача.....	95
Таб. 5.3.1 Резултати методе за процене поузданости и доношења одлуке о одржавању разводног постројења на бази тренутног стања опреме .....	98
Таб. 5.3.2 Резултати примене методе минималних пресека и подаци потребни за прорачун <i>SPI</i> .....	101
Таб. П. 0.1 База правила за експертски подсистем електричних особина намотаја ЕТ.....	133
Таб. П. 0.2 База правила за експертски подсистем електричних особина проводних изолатора ЕТ-а.....	133
Таб. П. 0.3 База правила за експертски подсистем механичких особина намотаја ЕТ.....	134
Таб. П. 0.4 База правила за експертски подсистем за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а.....	135
Таб. П. 0.5 База правила за експертски систем са <i>Mamdani</i> типом закључивања за ЕТ.....	136
Таб. П. 0.6 База правила за експертски систем са <i>Sugeno</i> типом закључивања нултог реда за ЕТ.....	137
Таб. П. 0.7 База правила за експертски систем са <i>Sugeno</i> типом закључивања за ЕТ.....	138
Таб. П. 0.8 База правила за експертски систем СМТ.....	139
Таб. П. 0.9 База правила за експертски подсистем за контакте прекидача.....	140
Таб. П. 0.10 База правила за експертски подсистем за комору и медијум гашења електричног лука код прекидача.....	140
Таб. П. 0.11 База правила за експертски подсистем за погонски механизам прекидача.....	141
Таб. П. 0.12 База правила за експертски подсистем за контакте растављача.....	141
Таб. П. 0.13 База правила за експертски подсистем за покретне делове растављача.....	142

## 1. УВОД

Поуздан и сигуран пренос електричне енергије уз минимално време прекида рада и минималне губитке јесте циљ сваког електроенергетског система (ЕЕС). Испуњење овог циља подразумева минимизацију броја отказа елемената ЕЕС-а, као и минимизацију неиспоручене електричне енергије у случају да до отказа ипак дође. Да би ЕЕС адекватно функционисао и испуњавао основне задатке потребно је на правилан и правовремени начин одржавати елементе ЕЕС-а. Карактеристике елемената ЕЕС-а се током експлоатације неповратно мењају услед већег броја фактора. Различити стандарди и правилници електропривредних и електропреносних предузећа дефинишу различите мерне методе и показатеље којим се утврђују карактеристике елемената ЕЕС-а. Правилницима су утврђени интервали и периоди између међусобних испитивања. Постоји велики број развијених метода које су базиране, како на мерењима у погону (*on-line* методе), тако и на мерењима у лабораторији (*off-line* методе). Различите методе генеришу специфичне податке који треба да укажу на поједине кварове делова елемената ЕЕС-а. На основу актуелних мерених података искуственим путем одређује се потреба за ремонтом, ревитализацијом или заменом испитиваног елемента. Код искуственог доношења одлуке не води се рачуна о поузданости осталих елемената ЕЕС-а и економским импликацијама донете одлуке. Међутим дерегулација ЕЕС, динамичко тарифирање цене електричне енергије и надокнада пеналима за неиспоручену електричну енергију стварају притисак на електропреносна и електропривредна предузећа. Притисак се односи на смањење губитака електричне енергије и смањење ризика од прекида напајања и хаварије скупе електроенергетске опреме. Такође убрзан развој интелигентног ЕЕС-а олакшава прикупљање, складиштење и употребу података добијених великим бројем испитивања елемената ЕЕС-а. Развој рачунарске опреме омогућава да се велики број генерисаних података може адекватно тумачити уз примену метода из домена вештачке интелигенције.

Делови ЕЕС-а који доста утичу на рад и поузданост комплетног ЕЕС-а су разводна постројења. Да би се донела правилна одлука о одржавању разводног постројења, потребно је познавати стање и поузданост постројења и могуће

економске ефекте које поједине одлуке могу да донесу. Посебно су важна високонапонска разводна постројења јер њихов квар, прекид рада, изазива веће губитке електричне енергије и могуће страдање скупе електроенергетске опреме. Поузданост високонапонског разводног постројења највише зависи од поузданости рада највећих и најоптерећенијих елемената ЕЕС-а. Елементи чија се поузданост најчешће разматра су високонапонски растављачи, прекидачи, енергетски и мерни трансформатори. Поузданост елемената ЕЕС-а се односи на интензитет квара и време прекида рада на годишњем нивоу за посматране елементе. Прорачун поузданости пружа увид на број кварова на годишњем нивоу и не пружа могућност доношења одлуке на основу тренутног стања елемената ЕЕС-а. Поузданост и интензитет квара елемента ЕЕС-а је могуће одредити на основу битнијих испитивања елемената. На основу таквог прорачуна могуће је донети одлуку о одржавању појединачне опреме и целокупног разводног постројења на основу тренутног стања високонапонске опреме.

Одржавање високонапонских постројења је разматрано у великом броју радова где се користе и модификују три основна типа стратегије одржавања [1],[2],[3], [4], [5]:

- корективно одржавање,
- превентивно одржавање и
- одржавање на бази поузданости.

Корективно одржавање подразумева активности тек након што је дошло до квара, па као такво је техноекономски оправдано само за ниженапонска постројења мање погонске важности. Превентивно одржавање се може вршити:

- у временски дефинисаним интервалима (*Time Based Maintenance – TBM*) и
- према стању (*Condition Based Maintenance – CBM*).

Временски интервали периодичног одржавања (*TBM*) дефинисани су у интерним стандардима електропривредних и електропреносних предузећа на основу претходног искуства одржавања. Превентивно одржавање према стању (*CBM*) врши се онда када системи за континуални мониторинг погонског рада високонапонске опреме укажу на потребу за тиме. Одржавање на бази поузданости (*Reliability centered maintenance – RCM*) стратегија је која користи

комбинацију тренутног стања опреме и њеног значаја у разводном постројењу. Од значаја за ову дисертацију су радови и методе који се односе на прорачун поузданости и стратегију одржавања разводних постројења на бази тренутног стања и поузданости високонапонске опреме (*reliability centered asset management – RCAM*) [6], [7], [8]. У актуелној литератури [9], [8], [10],[11], [12], [13] и [14] је популарна примена различитих метода вештачке интелигенције. Методе које се јављају у радовима користе једну технику или комбинацију техника: Монте Карло симулација, фази теорија, вештачке неуралне мреже, генетски алгоритам и други алгоритми оптимизације. Због своје обимности не постоје радови који сагледавају мониторинг и дијагностику високонапонске опреме и на основу тога врше прорачун поузданости и разматрање одржавања постројења. Са друге стране, постоји велики број радова који се односе на поједине методе мониторинга и дијагностике високонапонске опреме. За дисертацију су од значаја радови и стандарди који садрже податке и описују методе мониторинга и дијагностике у вези са:

- енергетским трансформатором [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21],[22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29] и [30];
- мерним трансформатором [31], [32] и [33];
- прекидачем [34],[13], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [4], [41], [42] и [43],
- растављачем [34], [44], [45], [5] и [46].

Сви радови се односе на појединачне методе испитивања високонапонске опреме и, у складу са тим, указују на вероватноћу квара и поузданост рада само појединих, испитиваних, делова опреме. Такође, радови не узимају у обзир мерну несигурност и неизвесност података који фигуришу у методама.

У овој докторској дисертацији је описан комплетан алгоритам доношења одлуке о одржавању високонапонског постројења и високонапонске опреме на бази мониторинга и дијагностике тренутног стања високонапонске опреме. Први и најзначајнији део алгоритма се односи на одређивање показатеља стања високонапонске опреме применом фази логике из домена вештачке интелигенције. Термовизијска (термографска) испитивања представљају *on-line* поступак који налази све већу примену у мониторингу опреме високонапонских

постројења. Комбиновањем резултата термографије и резултата других испитивања (хроматографска испитивања (DGA), испитивања у фреквенцијском домену (FRA), праћење температуре, броја и времена трајања операција опреме) могуће је објективније проценити развој квара опреме и правовремено спречити хаварије у високонапонском постројењу. Да би сви мерни подаци из најбитнијих испитивања били искоришћени, формиран су фази експертски системи који одређују вероватноћу квара. Вероватноћа квара је уједно интензитет квара и указује на хитност интервенције код прекидача, растављача, енергетских и мерних трансформатора. Сваки развијен фази експертски систем представља фази модел високонапонске опреме који служи за доношење одлуке о приоритету одржавања опреме. У другом делу алгоритма је описана модификација методе минималних пресека [47] за прорачун поуздности „Н“ шеме разводног постројења. Модификација се односи на прорачун са фази бројевима који су формиран на основу базе података. Применом фази теорије превазилазе се одређени недостаци који настају услед обједињавања резултата различитих мерних метода и неизвесности, несигурности мерних података. Задњи део алгоритма се односи на доношење одлуке о ремонту, ревитализацији или замени појединих делова опреме у високонапонском постројењу. Доношење одлуке се базира на резултатима прорачуна поуздности разводног постројења на основу тренутног стања високонапонске опреме. Економске импликације одлука су сагледане кроз мапу ризика [48], [49], [34], [50], [39] и индекс перформансе система [51]. Фази експертски системи и модификована метода за прорачун поуздности и доношење одлуке, базирана на фази теорији, развијени су у програмском пакету MATLAB. Тако развијена метода је тестирана за реалне термографске снимке и податке преузете од ЈП „Електроурежа Србије“ и ЈП „Електропривреда Србије“.

Докторска дисертација је организована у шест поглавља.

У првом поглављу су представљена уводна разматрања и дат је преглед тренутног стања у области мониторинга и дијагностике високонапонске опреме у разводним постројењима применом напредних метода вештачке интелигенције. Такође су наведени радови који се односе на прорачун поуздности и стратегију

одржавања разводних постројења на бази тренутног стања високонапонске опреме.

Друго поглавље се односи на разматрање најбитнијих метода испитивања прекидача, растављача, енергетских и мерних трансформатора. За сваки од четири елемента високонапонске опреме су утврђени најбитнији показатељи стања. За сваки од показатеља су представљена тумачења његових вредности на бази литературе и стандарда.

Треће поглавље се односи на примену фази теорије за одређивање стања високонапонске опреме. Дат је опис формирања фази експертских система за прекидач, растављач, енергетски и мерни трансформатор. Посебна пажња је посвећена формирању различитих типова фази експертских система за енергетски трансформатор.

У четвртном поглављу је представљен начин употребе резултата мониторинга и дијагностике високонапонске опреме. Представљене су методе које су коришћене за прорачун поузданости разводног постројења на бази тренутног стања опреме. Такође су описане и модификације метода за прорачун поузданости и доношење одлуке у смислу увођења фази бројева. Наглашено је коришћење резултата методе минималних пресека кроз мапу ризика и индекс перформансе система.

Пето поглавље описује рачунарске симулације које су спроведене на основу реалних података за одређено разводно постројење. Резултати симулација су такође приказани у овом поглављу. Анализирана је осетљивост резултата фази модела ЕТ-а и његова валидација.

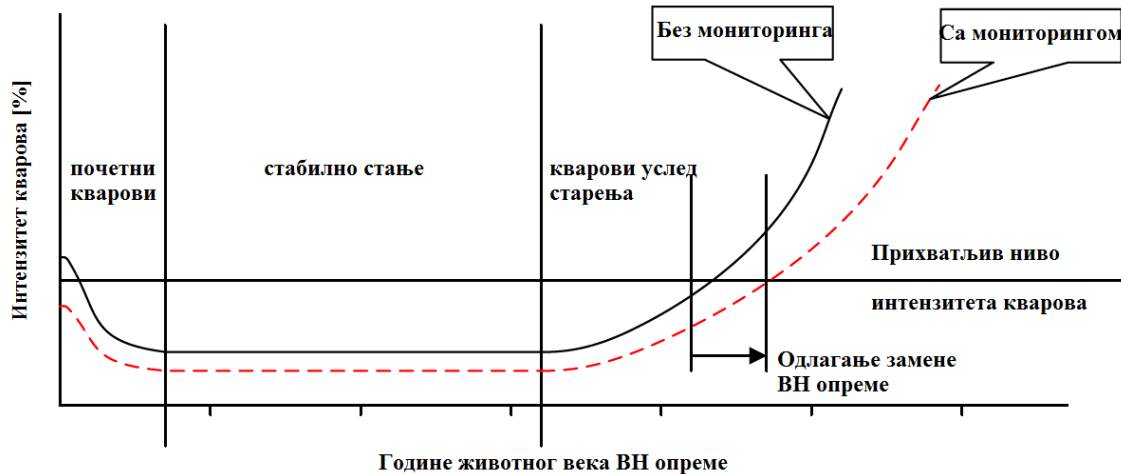
У шестом поглављу су истакнути основни закључци ове докторске дисертације и наглашени су њени главни доприноси као и могућности примене у привреди.

## 2. МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА

### 2.1. Уводна разматрања

Појам дијагностике (од грчке речи *diagnosis* – закључивање или оцењивање) прво се појавио у медицинској науци, док у техничким наукама постоји тек неколико десетина година. Техничка дијагностика подразумева различите мерне методе и процедуре које се спроводе ради правовременог утврђивања тренутног стања техничких система и предвиђања њиховог будућег стања. Дијагностика проверава техничку исправност и функционалност система и, ако квар постоји, она истражује место, облик и узрок тог квара. Развој мерне и рачунарске опреме омогућио је увођење јединственог система за интегралну дијагностику комплетне високонапонске опреме у савременом разводном постројењу. Савремени систем надзора који истовремено прати вредности више параметара унутар постројења и пружа податке који су континуално доступни представља мониторинг разводног постројења. Мониторинг једног разводног постројења пружа увид у стотинак и више параметара, од који се највећи број односи на најбитнију високонапонску опрему: прекидаче, растављаче, енергетске и мерне трансформаторе. У зависности од физичке природе посматраних параметара, дијагностика може бити хемијска, електрична, термичка, оптичка и механичка. Мониторингом се, дакле, прате параметри потребни за исправан рад високонапонске опреме, а дијагностиком се измерене вредности тих параметара упоређују са референтним вредностима. Дијагностичко упоређивање се врши у односу на вредности параметара добијених код пријемних испитивања при пуштању опреме у погон и вредности параметара у досадашњем животном веку опреме. На основу тог упоређивања и вредности истих параметара у прошлости могуће је закључити настанак или напредовање већ постојећег квара на опреми. Такође, дијагностика омогућава процену прогресије старења услед неповратне промене у физичким и хемијским карактеристикама материјала који чине изолацију високонапонске опреме. Правилним сагледавањем свих прикупљених података може се проценити преостали животни век високонапонске опреме и

донети правовремена одлука о ревитализацији, ремонту или замени опреме. Одговарајућим мониторингом опреме и правилном дијагностиком врши се правовремено одржавање, чиме се продужава животни век високонапонске опреме (Сл. 2.1.1). На тај начин мониторинг и дијагностика разводног постројења и високонапонске опреме у њему доводе до повећања поузданости и расположивости опреме и смањења трошкова одржавања и поправке опреме.



Сл. 2.1.1 Утицај одржавања високонапонске опреме са и без мониторинга на интензитет кварова [1]

Мониторинг и дијагностика у електроенергетици заједно подразумевају аутоматизовано и континуално одређивање стања целокупног разводног постројења и високонапонске опреме у њему. Комплетан систем мониторинга и дијагностике захтева експертски систем који на основу сакупљених података и дијагностичких алгоритама рано упозорава оператера на предстојећа дешавања и могуће проблеме у разводном постројењу. На основу записа о постојећим догађајима експертски систем треба уједно и да препоручи оператеру његове потребне акције у новонасталој ситуацији у разводном постројењу. Највећи допринос докторске дисертације је алгоритам по којем се формирају фази експертски системи који представљају фази моделе стања најбитније високонапонске опреме у разводном постројењу.

Идеја за формирање експертског система за дијагностику је настала на основу поставки термодијагностике у интерним стандардима и препорукама електропреносних предузећа. Термодијагностика се базира на термовизијским (термографским) испитивањима која представљају *on-line* бесконтактни поступак



који налази све већу примену у мониторингу елемената високонапонских разводних постројења. Познато је да услед протицања електричне струје кроз проводнике и електричну опрему долази до њиховог загревања. Загревање је показатељ не само тренутног оптерећења разних делова постројења већ и укупног стања опреме. Дугорочно гледано, загревање се може користити као показатељ квалитета уграђене опреме у постројење као и квалитета обављених ремонтних радова. Термовизијско мерење температуре загревања и рад термографских камера се заснива на чињеници да свако тело с температуром изнад апсолутне нуле емитује електромагнетска топлотна зрачења инфрацрвеног спектра. Зрачење је последица вибрација узрокованих хаотичним термичким кретањем молекула у различитим материјалима присутним код високонапонске опреме. Вредност радијације, зрачења, расте са порастом температуре испитиване опреме. Термографска камера својим сензором детектује зрачење и претвара га у електрични сигнал који се тумачи као информација о температури. Употребом различитих боја софтвер камере користи информације о температури и ствара термографску дводимензионалну слику (термограм). Термограм нуди температурну расподелу видљивог дела површине испитиваног објекта као и вредности температуре најтоплијих тачака на тој површини. Термограм се анализира поређењем са референтном тачком, утврђеном за анализиран објекат. Углавном се као референтна тачка узима сличан или идентичан део опреме, који је изложен истим радним условима и условима околине, који као такав треба да показује слично топлотно поље. На термограму се проналази референтно, исправно, место и неисправно, топло, место. Разлика температура ова два места назива се прегревање. Сва прегревања су према интерном стандарду и препорукама разврстана у три категорије:

- прегревања до 10 °C. У овом случају прегревања се могу толерисати дуже време, али се стање прати и планира се интервенција,
- прегревања између 10 °C и 30 °C. У овом случају ревизију би требало обавити у року до 60 дана, тј. при првом заустављању погона и
- прегревања преко 30 °C. Ревизија је хитна и оваква прегревања су приоритетна.

Прикупљање термографских снимака и складиштење у базу података омогућава праћење развоја квара, деградације и старење елемента. Посебна погодност овог бесконтактног метода мерења температуре је у томе што се сва мерења обављају у реалним погонским условима, без ремећења функционисања система. Превентивна термографска мерења омогућавају избегавање хаварија у систему у великом броју случајева, као и благовремено планирање искључења појединих делова електроенергетског система. Применом термовизије откривају се лоши контакти спојних места високонапонске опреме, струјни трансформатори са отвореним секундаром, оштећене коморе прекидача, кварови на систему за хлађење трансформатора, као и многи други кварови настали променама у материјалу различитих делова високонапонске опреме.

За дијагностику стања високонапонске опреме није довољно познавати само температуру прегревања. Такође хитност интервенције на опреми се не може заснивати само на једном податку. Класификација температуре прегревања у три групе није довољно адекватна нити прецизна да би се само на томе планирало одржавање високонапонске опреме. Основна идеја је да се у обзир узима и температура претходног прегревања, на основу чега би се уочило напредовање квара. Такође, у обзир треба узети и животни век опреме, јер старија опрема захтева већу хитност интервенције и представља већу опасност по ЕЕС. Међутим, ова три податка и даље нису довољна за адекватно доношење одлуке о одржавању високонапонске опреме. Различити уређаји високонапонске опреме имају различите специфичне методе испитивања и показатеље који могу бити искоришћени за доношење одлуке о хитности интервенције на тим уређајима. Како би сви релевантни показатељи били искоришћени код формирања фази експертског система, у даљем тексту је дат преглед метода за мониторинг и дијагностику прекидача, растављача, енергетског и мерног трансформатора.

## **2.2. Енергетски трансформатор**

Енергетски трансформатор (ЕТ) је уређај који трансформише енергију из једног магнетног кола у друго, при чему повећава или смањује напон у зависности од своје улоге. Као такав, ЕТ је од виталног значаја за пренос и дистрибуцију електричне енергије. Он је уједно и најскупљи елемент у сваком делу и на сваком

напонском нивоу ЕЕС-а. Са друге стране, ЕТ је уједно и најкомплекснији електроенергетски елемент, на чији рад имају утицај термички, механички, електрични и хемијски процеси. И поред своје комплексности, ЕТ-и се пројектују тако да могу безбедно да раде 25–40 година, а уз правилно одржавање и преко 60 година. Као најскупљи и најбитнији елемент ЕЕС-а, трансформатору је посвећено највише метода дијагностике и мониторинга. Цена дијагностике и мониторинга ЕТ-а је неупоредива са ценом самог уређаја. Зато се велики напори улажу да се правилним мониторингом и дијагностиком врши правовремено и правилно одржавање које ће продужити животни век ЕТ-а. Кључни делови трансформатора који су од велике важности за његов поуздан рад су:

- магнетно коло,
- намотаји (стање геометрија и стање електричних спојева),
- чврста изолација намотаја,
- пролазни изолатори,
- регулациона преклопка,
- активни део (стање намотаја, контаката и магнетног кола на бази *dissolved gases analysis* – DGA),
- трансформаторско уље,
- трансформаторски суд, расхладни систем и дилатациони суд.

Да би се набројани делови ЕТ-а испитали, постоје електричне и хемијске методе. Електричне устаљене методе које се користе су [15]:

- мерење отпорности изолације намотаја и проводних изолатора и одређивање индекса поларизације за намотаје,
- мерење фактора диелектричних губитака ( $\text{tg}\delta$ ) и капацитивности изолације намотаја и изолације пролазних изолатора,
- мерење струја и снага празног хода при сниженом напону, тј. мерење струје магнећења,
- мерење импедансе кратког споја, тј. индуктивности услед расипања,
- мерење парцијалних пражњења и
- снимање одзива намотаја у фреквенцијском домену (*frequency response analysis* – FRA метода).

Посебна група испитивања ЕТ-а обухвата мерење физичких, хемијских и електричних карактеристика уља:

- мерење садржаја гасова растворених у изолационом уљу (гаснохроматска анализа (DGA)),
- мерење садржаја воде и киселина у изолационом уљу,
- мерење садржаја деривата фурана у изолационом уљу и
- мерење диелектричне чврстоће и фактора диелектричних губитака уља.

Ниједна од набројаних метода испитивања и мониторинга, укључујући и термовизију, није свеобухватна. Сваки мерени параметар за који се везује нека дијагностичка метода указује на стање појединог дела трансформатора. Укупно стање трансформатора се заснива на што већем броју резултата различитих мерних метода, чијом се интерпретацијом добија слика целог трансформатора. Метода која сагледава комплетно стање ЕТ-а и користи резултате и информације из више испитивања је представљена у [48], [28] и [29]. Ова метода и радови су коришћени за валидацију формираних фази модела стања ЕТ-а у дисертацији.

Нов и сув ЕТ карактеришу високе вредности отпорности изолације као и високе вредности индекса поларизације. Отпорност изолације се односи на намотаје, проводне изолаторе и друге уземљене делове ЕТ-а. Старење ЕТ-а доводи и до старења електроизолационог система ЕТ-а, изазваног погонским условима. До смањења отпорности изолације, коефицијента поларизације и коефицијента апсорпције доводи појава влаге и издвајање талоба уља по намотају. Мерење отпорности изолације и одређивање индекса поларизације врши се U-I методом помоћу уређаја једносмерног напона, намењеног мерењу врло великих вредности отпорности. Услед једносмерног напона доведеног на прикључке трансформатора, кроз изолациони систем пролазе три компоненте струје: капацитивна, апсорпциона и омска струја. Временска константа капацитивне струје је мала док трајање апсорпционе компоненте струје је знатно дуже и она зависи од поларизационих процеса унутар диелектрика. На њу битно утиче присуство влаге и других поларних продуката. Временска константа апсорпционих процеса се услед присуства влаге и поларних нечистоћа насталих услед старења уљно-папирног изолационог система јако скраћује. Ова особина апсорпционих процеса се користи за утврђивање овлажености изолације преко

односа израчунатих изолационих отпорности. Карактеристичне изолационе отпорности који се мере у различитим временским интервалима од почетка мерења су: десетоминутна ( $R_{10''}$ ), једноминутна ( $R_{60''}$ ) и петнаестосекундна ( $R_{15''}$ ) вредност изолационе отпорности. Индекс поларизације ( $IP$ ) се дефинише као однос  $R_{10''}/R_{60''}$ , а коефицијент апсорпције ( $IA$ ) као однос  $R_{60''}/R_{15''}$ . Вредности изолационих отпора и индекса зависе од карактеристика самог материјала, температуре, хлађења конструкције, напонског нивоа, снаге и других особина ЕТ-а. Критеријуми за вредности изолационих отпорности и индекса који би важили за различите типове ЕТ-а није могуће прецизно установити као универзалне. Ово је један од разлога због чега се експертски систем у овој дисертацији базира на фази теорији и примени Таб. 2.2.1 и Таб. 2.2.2. Најчешће се посматрају оријентационе граничне вредности [16] једноминутне изолационе отпорности сведене на референтну температуру 20 °С (Таб. 2.2.1). Свођење вредности отпорности на референтну температуру 20 °С је могућа помоћу формуле:

$$R_{20} = R_{\vartheta} \cdot e^{0.6244 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (2.2.1)$$

где је  $R_{20}$  сведена вредност изолационе отпорности на температуру 20 °С, а  $R_{\vartheta}$  је измерена вредност отпорности на температури  $\vartheta$ .

Таб. 2.2.1 Оријентационе граничне вредности  $R_{60''}$  намотаја ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16]

$U_n$ [kV]	$R_{60''}$ [MΩ] сведена на 20 °С		
	добро	сумњиво	опасно
≤ 35(20)	≥ 300	$225 \leq R_{60''} < 300$	< 225
110	≥ 800	$600 \leq R_{60''} < 800$	< 600
220	≥ 1600	$1200 \leq R_{60''} < 1600$	< 1200
400	≥ 2700	$2100 \leq R_{60''} < 2700$	< 2100

Добро означава задовољавајуће стање ЕТ-а код кога је потребна редовна периодика испитивања. Сумњиво стање ЕТ-а се односи на то да су вредности параметра погоршане али да су и даље у прописаним границама. За овакво стање препоручује се поновна контрола. Лоше стање је условљено вредностима  $R_{60''}$  испод дозвољених и захтева искључење и детаљније испитивање ЕТ-а.

Таб. 2.2.2 Оријентационе граничне вредности  $IP$  за различита стања ЕТ-а [16]

$IP = R_{10}/R_{60}$	Оријентационо стање ЕТ
<1	<b>опасно</b>
1 до 1,1	<b>лоше</b>
1,1 до 1,25	<b>сумњиво</b>
1,25 до 2,0	<b>задовољава</b>
>2	<b>добро</b>

Генерално гледано, погодније је посматрати један од два поменута индекса јер указују на две измерене вредности отпорности и утицај времена испитивања код параметара. Код мањих напонских нивоа и назначених снага добре, пожељне, вредности коефицијената су 1 или нешто изнад 1, док на вишим напонима ове вредности крећу се од 1,1 до 1,3 и више. Дакле, високе вредности коефицијената указују на сув и чист ЕТ, а ниске вредности указују на овлаженост и остарелост намотаја ЕТ-а или запрљаност проводних изолатора. Таб. 2.2.2 је лакше и боље применити у експертским системима јер указује на више стања ЕТ-а у односу на Таб. 2.2.1. Једноминутна електрична отпорност изолационог система проводних изолатора се мери ради утврђивања њихове исправности, али се не мери у склопу редовних испитивања. Стога  $R_{60}$  за проводне изолаторе неће бити узет у обзир код фомирања експертског система за ЕТ, већ ће се у ту сврху посматрати фактор диелектричних губитака. Уопштено гледано, мерење отпорности изолације није довољно прецизна метода, али је јако јефтина, па као таква се иницијално обавља при испитивању изолационог система ЕТ-а. Оријентационе вредности у Таб. 2.2.1 и Таб. 2.2.2 нису јединствене, па се препоручује упоређивање измерених вредности са претходно измереним.

Мерење фактора диелектричних губитака ( $tg\delta$ ) и капацитивности ( $C$ ) изолације намотаја и проводних изолатора се врши исто када се и проверава електроизолациони систем ЕТ-а. На тај начин се врши и провера стања ЕТ-а утврђеног испитивањем отпорности, јер је  $tg\delta$  обрнуто сразмерно отпорности:

$$tg\delta = \frac{1}{R\omega C} \quad (2.2.2)$$

Сви уређаји за мерење  $tg\delta$  истовремено мере и  $C$  при истим испитним напонима коришћењем Шеринговог моста. Вредности за  $C$  нису утврђене за оцену стања

ЕТ-а, међутим, и осим тога, оне се увек бележе уз  $tg\delta$ . Разлог томе је тај што је вредност  $C$  у вези са конструкцијом намотаја, геометријом изолационог система и карактеристикама употребљених материјала. Са аспекта дијагностике најбоље је посматрати промену вредности капацитивности у односу на претходну измерену вредност и фабрички измерену вредност. За проводне изолаторе вредности измерених капацитивности ( $C_{PI}$ ) не смеју се разликовати од вредности измерених у фабрици за више од грешке употребљене методе. Једно искуствено правило из стандарда [16] указује да повећање вредности  $C_{PI}$  за више од 10% захтева уклањање проводног изолатора. Критеријумске граничне вредности  $tg\delta$  на основу којих се даје процена стања изолационог система ЕТ-а није могуће једноставно и једнозначно утврдити генерално за све типове ЕТ-а. Као и за отпорност изолације за  $tg\delta$  је могуће усвојити оријентационе вредности за три различита дефинисана стања изолације ЕТ-а на различитим напонским нивоима ЕЕС-а. Усвојене вредности дефинишу критеријуме за намотаје (Таб. 2.2.3) и за проводне изолаторе (Таб. 2.2.4), при чему се вредност  $tg\delta$  своди на температуру од 20 °С:

$$tg\delta_{20} = tg\delta_{\vartheta} e^{-0,0202 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (2.2.3)$$

Таб. 2.2.3 Оријентационе граничне вредности  $tg\delta$  намотаја ( $tg\delta_{нам}$ ) ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16]

$U_n$ [kV]	$tg\delta_{нам}$ [%] сведена на 20 °С		
	добро	сумњиво	опасно
$\leq 35(20)$	$< 1,00$	$1,00 \leq tg\delta < 1,70$	$\geq 1,70$
110	$< 1,00$	$1,00 \leq tg\delta < 1,50$	$\geq 1,50$
220	$< 0,65$	$0,65 \leq tg\delta < 0,85$	$\geq 0,85$
400	$< 0,45$	$0,45 \leq tg\delta < 0,60$	$\geq 0,60$

Таб. 2.2.4 Препоручене максималне вредности  $tg\delta$  проводних изолатора ( $tg\delta_{ни}$ ) ЕТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а [16]

$U_n$ [kV]	$\max(tg\delta_{ни})$ [%] сведена на 20 °С		
	добро	сумњиво	опасно
$\leq 110$	$\leq 0,7$	$\leq 1,0$	$> 1,0$
220	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$	$> 0,9$
400	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$	$> 0,8$

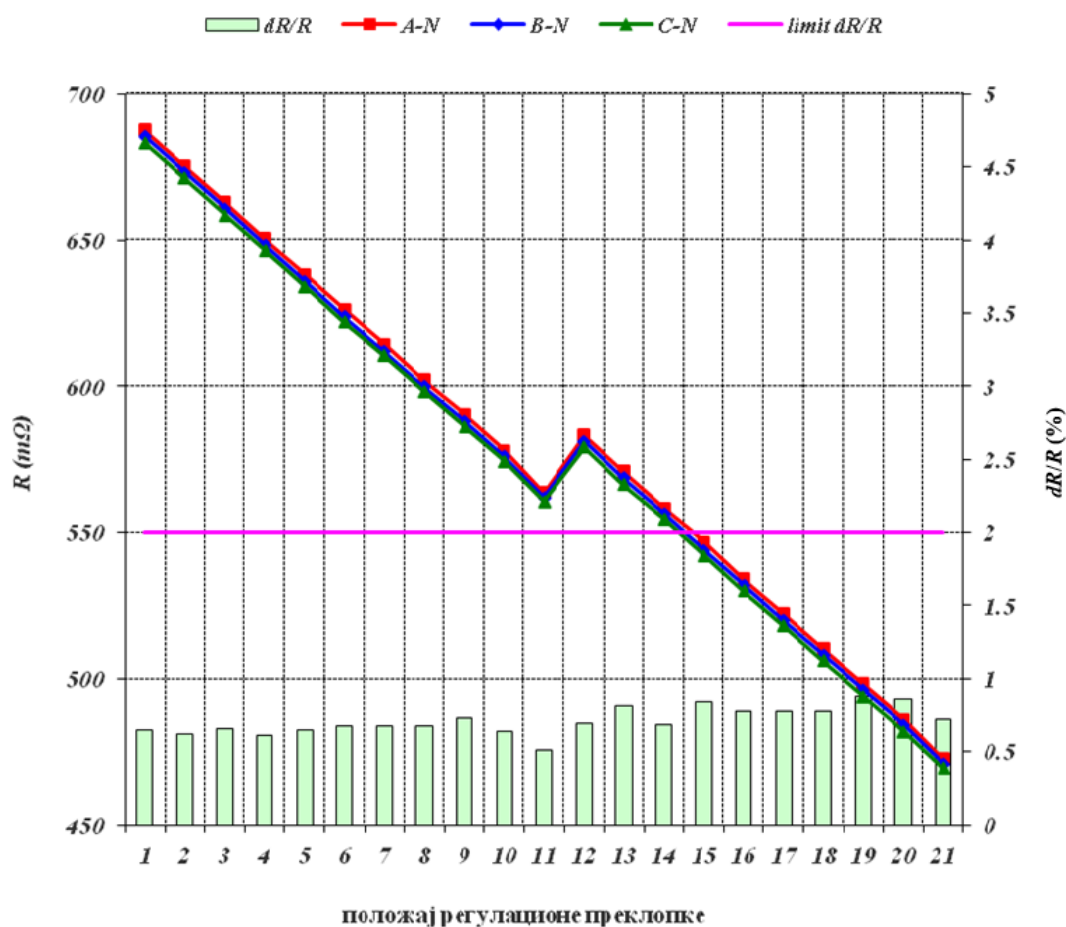
Претходна формула је генерална за свођење вредности  $tg\delta$ ; за прецизније свођење постоје посебне табеле са корекционим факторима које дефинишу произвођачи опреме. Пожељно је посматрати и промену вредности  $tg\delta$  у односу на измерене фабричке вредности. Та разлика вредности не би требало да је већа од 30%, а овај податак може послужити код формирања експертског система. Мерење  $tg\delta$  је такође устаљено и код испитивања трансформаторског уља. Препоручено тумачење резултата код овог мерења је представљено у Таб. 2.2.5 и на основу њега се може утврдити потреба за ревитализацијом или заменом уља.

Таб. 2.2.5 Препоручене вредности  $tg\delta$  трансформаторског уља ( $tg\delta_{уља}$ ) ЕТ-а код дијагностиковања стања уља [16]

$tg\delta_{уља}$ [%] сведена на 20 °C		
добро	сумњиво	опасно
$\leq 0,005$	$0,005 < tg\delta_{уља} \leq 0,02$	$> 0,02$

Прекид рада ЕТ-а у 19% случајева је узроковано кваром на намотају, а у 12% случајева кваром на проводном изолатору. Најчешћи и доминантни узрок кварова на ЕТ-у у чак 41% случајева је теретни регулатор напона ЕТ-а (регулациона преклопка). Мерење електричне отпорности намотаја ( $R_{Cu}$ ) се врши ради провере спојева унутар ЕТ-а и, пре свега, процене стања прелазних отпора контаката регулационе преклопке. Мерење се врши једносмерним напоном, а најчешће методе су: U-I метода са четворокрајним приступом испитиваном намотају и метода Томпсоновог моста која се заснива на поређењу пада напона кроз испитивани намотај и пада напона кроз еталонску отпорност. Отпорност намотаја са регулационом преклопком се мери у свим положајима регулационе преклопке и као такав се евидентира и приказује (Сл. 2.2.1) у извештајима испитивања. Максимална релативна међуфазна разлика отпорности намотаја ( $dR_{Cu}/R$ ) не треба да буде већа од 5%, а ако је већа од 2%, препоручује се учестаније мерење отпорности намотаја са контролом топлих тачака у ЕТ-у путем гасно-хроматографске анализе узорака трансформаторског уља (Таб. 2.2.6).





Сл. 2.2.1 Промена отпорности сва три фазна намотаја у зависности од положаја регулационе преклопке [52]

Таб. 2.2.6 Граничне вредности максималне релативне међуфазне разлике отпорности намотаја за различита стања ЕТ-а [52]

max ( $dR_{C_{u/R}}$ ) [%]	Стање трансформатора
$\leq 2$	<b>задовољавајуће</b>
2-5	<b>сумњиво</b>
$>5$	<b>опасно</b>

Мерење струје празног хода ( $I_o$ ) при сниженом напону, тј. мерење струје магнећења може да укаже на промене на намотајима и у магнетном колу ЕТ-а. Мерење је могуће обавити монофазно и трофазно, а струје празног хода треба да су симетричне. У зависности од спреге, струје у два намотаја су приближно исте (дозвољеног одступања до 5%), а у трећем намотају се јавља струја већег интензитета (дозвољеног одступања 25–50%). Иначе, и код ове методе

испитивања ЕТ-а погодно је посматрати одступања интезитета  $I_o$  од фабричких вредности. Одступања не би требало да буду већа од декларисане мерне несигурности (грешке) употребљеног мерила [16].

Мерење импедансе кратког споја, тј. индуктивности услед расипања ( $L\gamma$ ) указује на промене геометрије намотаја услед деловања електромагнетних сила и електродинамичких сила које настају при блиским кратким спојевима. Услед нормалног погона ЕТ-а долази до растресања и могуће деформација намотаја, док при кратким спојевима јаке динамичке силе доводе до трајне, пластичне деформације намотаја. Критеријуми за релативно међуфазно и појединачно одступање  $L\gamma$  се деле у две групе [16]: •

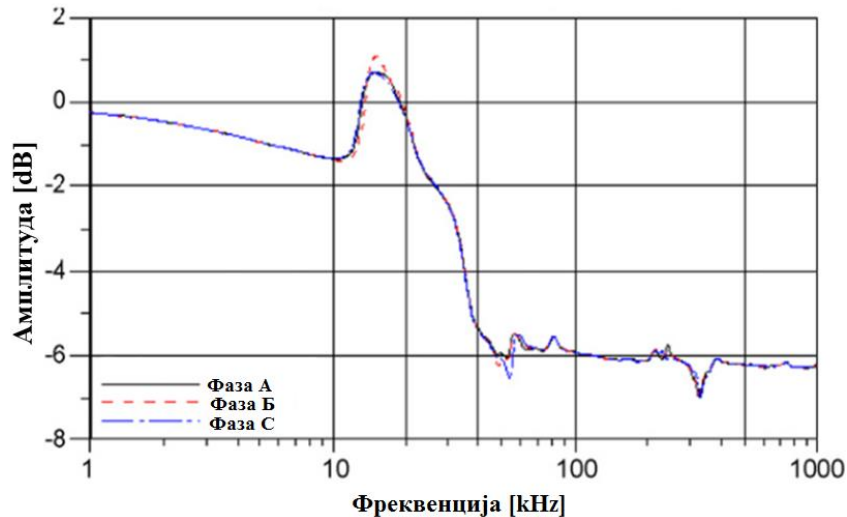
- одступање 2% – 4% у односу на вредности фабричких или пријемних испитивања указује да постоје промене у геометрији намотаја и
- одступање 4% – 6% указује на значајно деформисање намотаја или њихово оштећење.

Помереност намотаја трансформатора се још може детектовати: испитивање нисконапонским импулсима (*Low Voltage Impulse Testing – LVI*), мерење фреквенцијске зависности губитака који су последица лутајућих струја (*Frequency Response of Stray Losses – FRSL*) и мерењем фреквенцијског одзива (*Frequency Response Analysis – FRA*) [53]. Испитивања намотаја у фреквенцијском домену (FRA) подразумевају упоређивање фреквенцијског одзива два периодична испитивања намотаја. Фреквенцијски одзив се добија као резултат прикључења контролног сигнала на улаз испитиваног намотаја. Испитни сигнали могу бити различити:

- импулсни сигнал са стрмим челом,
- простопериодични са променљивом учестаношћу и
- простопериодични са променљивом амплитудом и учестаношћу у широком опсегу учестаности.

Намотаји ЕТ-а се понашају као четворокрајници са подужним  $R$ ,  $L$  и  $C$  параметрима. Наиласком на четворокрајник испитни, улазни, сигнал слаби, а резултат методе је слабљење сигнала које се представља у логаритамској размери са јединицом dB [17], [18], [19]. Уколико се два упоређивана фреквенцијска одзива не разликују, значи да се ни подужни параметри нису значајно променили.

Тумачење резултата FRA се врши искуствено визуелним путем на основу слика које генеришу специјализовни уређаји за оваква испитивања. У великом броју испитивања није довољно посматрати само фреквенцијски одзив, већ се формирају функције преноса за свако испитивање (Сл. 2.2.2).



Сл. 2.2.2 Промена амплитуде преносне функције сва три фазна намотаја у зависности од фреквенције [52]

Упоређивањем генерисаних функција преноса код узастопних испитивања могу се открити различите промене геометрије намотаја и промене на магнетном колу ЕТ-а. Различитом интерпретацијом резултата FRA методе може се доћи до различитих закључака. Зато се у радовима [20] посматрају коефицијенти корелације (*correlation coefficient* – CC), стандардна девијација, максимум апсолутне разлике (*maximum absolute difference* – DABS), сума квадрата одступања и други карактеристични фактори за два сигнала преносне функције. Као закључак прегледа радова и стандарда најпоузданији и свеобухватни фактор који је потребно да се разматра јесте апсолутна сума логаритамске грешке (*absolute sum of logarithmic error* – ASLE), која се дефинише као:

$$ASLE(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} y_i - 20 \log_{10} x_i|}{N} \quad (2.2.4)$$

где су  $x_i$  и  $y_i$   $i$ -ти одбирци две преносне функције FRA одзива које се упоређују, а  $N$  је укупни број одбирака у упоређиваним сигнаlima. За појачану контролу параметара прате се коефицијенти CC и DABS који су дефинисани формулама:

$$CC(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (2.2.5)$$

$$DABS(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{N} \quad (2.2.6)$$

Критеријуми и генерална правила за оцену стања на основу ових параметара нису утврђени. Међутим, вредности ових параметара свакако боље указују на тренутно стање ЕТ-а у односу на визуелни преглед снимљених одзива који се врши у пракси. На почетку експлоатације ЕТ-а параметри *ASLE* и *DABS* имају вредности блиске нули, а параметар *CC* је приближно 1. Старењем ЕТ-а одступање у фреквенцијским одзивима се повећава, па вредности параметара *ASLE* и *DABS* расту, док коефицијент *CC* опада. На основу прегледа литературе може се закључити да, ако је параметар *ASLE* већи од 2, *DABS* већи од 0,1 и *CC* мањи од 0,65, онда је потребна хитна интервенција код испитиваног ЕТ-а.

Детекција и мерење интензитета парцијалних пражњења су најосетљивији услед сметњи у високонапонским разводним постројењима. Могуће је вршити мерење директном електричном методом користећи придодате спрежне кондензаторе одговарајућих капацитивности и индиректном акустичком методом. Основни критеријум је да при назначеном напону намотаја ЕТ-а не постоје парцијална пражњења. Уколико се парцијална пражњења детектују, обавезно се врши провера гасном анализом на узорку трансформаторског уља, а критеријуми за интензитет парцијалних пражњења су дефинисани у оквиру DGA методе. Стога експертски систем као свој улаз неће имати резултате детекције парцијалних пражњења, већ резултате DGA методе.

Постоји више метода за испитивање физичко-хемијских особина уља на основу којих се може проценити термичко, електрично и механичко старење ЕТ-а. Метода која је највише заступљена и која се доминантно користи је мерење садржаја, концентрације, гасова растворених у изолационом уљу (DGA). Главна предност DGA методе је та што је применљива на свим типовима трансформаторског уља и што детектује гасове у уљној фази, чиме даје најранију могућу детекцију развоја квара. Метода се пре свега спроводи лабораторијски,

али у последње време постоје и уређаји који се уграђују на ЕТ и врше *on-line* DGA анализу. Узроци настанка гасова су парцијална пражњења, прегревање (пиролиза или термичка разградња) и искрење. У зависности од ослобођене енергије квара настају гасови који карактеришу различите степене деградације стања ЕТ-а: метан ( $\text{CH}_4$ ), етан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), етилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), ациетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), водоник ( $\text{H}_2$ ), угљен-моноксид ( $\text{CO}$ ) и угљен-диоксид ( $\text{CO}_2$ ). За интерпретацију резултата DGA анализе користе се методе:

- према стандардима IEC 60599-1999 [22] и IEC 599-1978 [21],
- *Duval*-овог троугла [54],
- према стандарду IEEE C57-104 1991 [24] (*Rogers*-ова метода четири односа, *Doernenburg*-ова метода) и
- према стандарду IEEE C57-104 1978 [23] (*Rogers*-ова метода три односа).

Постоји велики број радова који се баве дијагностиком стања ЕТ-а на бази резултата DGA анализе. Стога су у дисертацији коришћени радови [25] и [14] који дају преглед и поређење резултата других радова и стандарда. На основу таквих радова може се уочити да се највише користе три односа концентрације гасова:

$$X = \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}; Y = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}; Z = \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6} \quad (2.2.7)$$

Таб. 2.2.7 представља модификовани приказ интерпретације DGA резултата према најстаријем стандарду IEC599-1978. У оквиру поменутог стандарда за сваки однос концентрације гасова се дефинишу четири карактеристична опсега вредности којима се додељују кодови. За различите комбинације кодова, тј. вредности односа  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  дијагностикује се одређено стање ЕТ-а.

Влага у ЕТ-у постоји чак и када је он нов, и она је концентрисана у чврстим деловима изолације. У току експлоатације ЕТ-а долази до разних хемијских и термичких процеса, услед чега се уљно-папирна изолација деградира. Услед деградације и промене радних стања ЕТ-а, при чему се мењају радне температуре, део укупне влаге флукуише из папира у уље у зависности од температуре и тако мења садржај воде у уљу. При повећању радне температуре

повећава се садржај воде у уљу који ће угрозити диелектричну чврстоћу изолационог система ЕТ-а.

Таб. 2.2.7 Критеријуми за оцену стања ЕТ-а на бази DGA резултата

Однос концентрације гасова			Стање трансформатора
X	Y	Z	
< 0,1	0,1 - 1,0	0 - 1,0	<b>нормално</b>
< 0,1	0,1 - 1,0	1,0 - 3,0	<b>благо прегревање <math>t &lt; 150</math> °C</b>
< 0,1	> 1,0	0 - 1,0	<b>благо разарање <math>150</math> °C <math>\leq</math> <math>t &lt; 300</math> °C</b>
< 0,1	> 1,0	1,0 - 3,0	<b>термичко разарање <math>300</math> °C <math>\leq</math> <math>t &lt; 700</math> °C</b>
< 0,1	> 1,0	> 3,0	<b>термичко разарање <math>700</math> °C <math>\leq</math> <math>t</math></b>
/	< 0,1	0 - 1,0	<b>парцијално пражњење мале енергије</b>
0,1 - 3,0	< 0,1	0 - 1,0	<b>парцијално пражњење велике енергије</b>
> 0,1	0,1 - 1,0	> 1,0	<b>пражњење мале густине енергије</b>
0,1 - 3,0	0,1 - 1,0	> 3,0	<b>пражњење велике густине енергије</b>

Код наглог растерећења ЕТ-а и наглом паду температуре уља долази до наглог повећања релативне влажности уља која директно умањује вредност његове диелектричне издржљивости. Релативна влажност трансформаторског уља у било ком тренутку не сме имати вредност већу од 30%. Код узимања узорка трансформаторског уља и његовог физичко-хемијског испитивања обавезно се одређује и садржај воде у уљу. Релативну влажност трансформаторског уља је могуће и *on-line* одредити, при чему се води рачуна о температури ЕТ-а. На основу тако одређене влажности уља и емпиријски утврђених карактеристика равнотеже концентрација воде у систему уље-папир, могуће је одредити садржај воде у чврстој изолацији  $C_p$ . Садржај воде у чврстој изолацији ЕТ-а се може одредити и помоћу *off-line* метода:

- метода мерења повратног напона (RVM – *Recovery Voltage Meter*),
- метода мерења струје поларизације и деполаризације (PDC – *Polarization-Depolarisation Current*) и

- метода мерења фактора диелектричних губитака у ширем опсегу учестаности – фреквенцијски зависна спектроскопија – (FDS – *Frequency Domain Spectroscopy*).

Дакле, на основу мерења садржаја воде у чврстој изолацији могуће је одредити масу воде у папирној и уљној изолацији која директно утиче на стање електроизолационог система ЕТ-а. Из тог разлога у Таб. 2.2.8 дефинисани су оријентациони критеријуми за садржај воде у чврстој изолацији.

Таб. 2.2.8 Оријентационе граничне вредности  $C_p$  за различита стања ЕТ-а [16]

$C_p$ [%]	Стање трансформатора
0,5	<b>нов ЕТ</b>
2,0	<b>задовољавајуће</b>
2,5	<b>потребно сушити ЕТ</b>
3,3	<b>папир почиње да интензивно стари</b>
4,5	<b>могућ пробој при 90°C</b>
7,0	<b>могућ пробој при 50°C</b>
8,0	<b>неприхватљиво стање</b>

Најбржи процеси старења унутар ЕТ-а се одвијају при највишој температури изолације која се може мерити или израчунавати на основу термичког модела ЕТ-а. Очекиван животни век ( $V$ ) трансформатора се може представити формулом:

$$V = e^{\alpha + \beta/T} \quad (2.2.8)$$

где су  $\alpha$  и  $\beta$  константе материјала изолације, а  $T$  апсолутна температура изолације [55]. Такође, добро познато Монтсингерово правило [26] указује да се изолација неповратно мења и да температура ЕТ-а условљава крај животног века ЕТ-а по формули:

$$V = 2,5 \cdot e^{-0,1155/T} \quad (2.2.9)$$

Животни век ЕТ-а се процењује према искуству електропривредних предузећа између 42 и 50 година [34], [56]. На основу стандарда [30] и [27] може се уочити да се нормална температуре изолације креће од -20 до 105 °C, а свака виша изазива убрзано старење ЕТ-а.

### 2.3. Мерни трансформатор

Мерни трансформатор (МТ) је уређај намењен трансформацији струје или напона за потребе мерних инструмената, бројила, заштитних и контролних уређаја. Струјни мерни трансформатор (СМТ) има улогу да смањи велике примарне струје и изолује секундарна кола од високог напона. Напонски мерни трансформатор (НМТ) служи да умањи велике примарне напоне и такође изолује секундарна кола од високог примарног напона. Обе врсте МТ-а у нормалним условима рада треба практично пропорционално да умање примарну величину уз минималну разлику фазних углова величина. Рад МТ-а директно утиче на рад веома битних заштитних, контролних и мерних уређаја. Дакле, без исправног рада МТ-а заштита и сигнализација разводног постројења неће адекватно радити. Због тога су МТ-и веома битни, па самим тим и њихово испитивање и одржавање. Просечни животни век МТ-а је краћи од ЕТ-а и реда је 30-40 година [34], [56]. Разлог томе је њихова конструкција и то што су изложени протицању великих струја, високим напонима и пренапонима. Природно старење и процес деградације изолације МТ-а током времена експлоатације доводе до различитих кварова који могу да доведу до потпуне дисфункције МТ-а. Да би се проверила функционалност МТ-а, стандарди [31] и [57] прописују за нове МТ-е типска, комадна и специјална испитивања. Ове врсте испитивања неће бити обрађене, јер се односе на фабричка испитивања МТ-а. Од важности за утврђивање стања МТ-а су периодична дијагностичка испитивања и контроле МТ-а који су у експлоатацији. Дијагностичке методе испитивања МТ-а су:

- преглед механичке исправности,
- преглед електричних спојева, примарних и секундарних струјних кола,
- преглед стања изолационог система,
- преглед уземљења и
- метролошки преглед.

Испитивање механичке исправности МТ-а обухвата визуелни преглед: спољне изолације, заптивања и нивоа уља, положаја мембране, положаја



искришта, прикључака и металних делова, степена корозије металних делова и учвршћења конструкције трансформатора. Под визуелним прегледом спада и провера вода за уземљење. Преглед електричних спојева, примарних и секундарних кола остварује се на основу термографског испитивања и мерења оптерећења секундарних кола. Електричне методе испитивања су једнаке или сличне као и за ЕТ, а додатна испитивања се односе на метролошки преглед МТ-а. Метролошки преглед представља проверу тачности МТ-а, односно одређивање преносног односа, струјне и фазне грешке. Контрола изолационог система је слична као и за ЕТ и састоји се од:

- мерења отпорности изолације и индекса поларизације,
- мерења капацитивности и фактора диелектричних губитака,
- детекције парцијалних пражњења и
- физичко-хемијске анализе (хроматографска анализа) узорака изолационог уља.

Таб. 2.3.1 Референтне вредности отпорности ( $R_{60''}$ ) изолације СМТ-а и НМТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а

$U_n$ [kV]	$R_{60''}$ [M $\Omega$ ] сведена на 20 °C		
	добро	сумњиво	опасно
$\leq 38$	/	/	/
123	$\geq 20\ 000$	$15\ 000 \leq R_{60''} < 20\ 000$	$< 15\ 000$
245	$\geq 40\ 000$	$20\ 000 \leq R_{60''} < 40\ 000$	$< 25\ 000$
420	$\geq 40\ 000$	$30\ 000 \leq R_{60''} < 40\ 000$	$< 30\ 000$

Таб. 2.3.2 Оријентационе граничне вредности  $IP$  за различита стања СМТ-а и НМТ-а

$IP = R_{10} / R_{60''}$	Оријентационо стање МТ
$< 1,4$	опасно
1,4 до 1,5	лоше
1,5 до 1,7	сумњиво
1,7 до 2,0	задовољава
$> 2$	добро

Електричне методе којима се врши мерење и свођење величина  $R_{60^\circ}$ ,  $IP$ ,  $C$ ,  $I$  и  $tg\delta$  су исте као и за ЕТ. У наредним Таб. 2.3.1, Таб. 2.3.2 и Таб. 2.3.3 су приказане оријентационе и референтне вредности за оцену стања МТ-а.

Таб. 2.3.3 Оријентационе граничне вредности  $tg\delta$  намотаја ( $tg\delta_{nam}$ ) СМТ-а и НМТ-а за различите напонске нивое ЕЕС-а

$U_n$ [kV]	$tg\delta_{nam}$ [%] сведена на 20 °C		
	добро	сумњиво	опасно
$\leq 35$	/	/	/
110	$\leq 0,6$	$0,6 < tg\delta \leq 1,0$	$> 1,0$
220	$\leq 0,5$	$0,5 < tg\delta \leq 0,7$	$> 0,7$
380	$\leq 0,5$	$0,5 < tg\delta \leq 0,7$	$> 0,60$

Детекција и мерење нивоа парцијалних пражњења су као и код ЕТ-а веома отежани због сметњи у постројењу. Код МТ-а ова врста испитивања је учесталија, па постоје одређене оријентационе вредности нивоа парцијалних пражњења. Ове оријентационе вредности зависе од уземљења неутралне тачке мреже, испитног напона и карактеристика изолације. Због тога је веома тешко уврстити ове услове и вредности у експертски систем. Појава парцијалних пражњења код МТ-а као и код ЕТ-а је разматрана кроз DGA методу. Референтне вредности DGA методе су исте као и за ЕТ и дате су у Таб. 2.2.7.

Таб. 2.3.4 Граничне вредности струјне и фазне грешке НМТ-а у зависности од класе тачности НМТ-а

Класа тачности	Напонска грешка изражена у процентима [%]	Фазна грешка изражена у центрарадијанима [crad]
0,1	0,1	0,15
0,2	0,2	0,3
0,5	0,5	0,6
1,0	1,0	1,2
3,0	3,0	/

За одређивање струјне и фазне грешке код МТ-а најчешће се примењују диференцијална метода и метода компензованог струјног компаратора. Граничне вредности струјне и фазне грешке за СМТ-е зависе од класе тачности и намене

(специјалне класе 0,2S, 0,5S и класа за заштиту P). Ове граничне вредности такође зависе и од оптерећења примарног намотаја. Граничне вредности струјне и фазне грешке МТ-а су сврстане према различитим стандардима [32], [33] и представљене у Таб. 2.3.5 и Таб. 2.3.4.

Таб. 2.3.5 Граничне вредности струјне,  $\Delta i$ , и фазне,  $\Delta \varphi$ , грешке СМТ-а у зависности од класе и примене СМТ-а

Класа тачности	Струјна грешка, $\Delta i$ , изражена у процентима [%] при наведеним				Фазна грешка, $\Delta \varphi$ , изражена у центрарадијанима [crad] при наведеним			
	Процентима назначене примарне струје							
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	5,4	2,7	1,8	1,8
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
3	/	/	/	3	/	/	/	/
5	/	/	/	5	/	/	/	/
5P	/	/	/	1	/	/	/	1.8
10P	/	/	/	3	/	/	/	/

## 2.4. Прекидач

Високонапонски прекидач је расклопни елемент који служи за успостављање, трајно провођење и прекидање струја. Прекидање струја се односи на ситуације при уобичајним манипулацијама у разводном постројењу и на ситуације кратког споја. Прекидањем струја кратког споја прекидач штити све елементе ЕЕС-а од хаварија и зато је битан за поузданост разводног постројења. Прекидач треба да обезбеди успешно прекидање електричног кола и брзо гашење електричног лука, уз минимале склопне пренапоне. Независно од врсте прекидача постоје три основна дела прекидача која су битна за његов исправан рад: комора за гашење лука, изолатор и погонски механизам. Прекидачи се деле на основу коморе за гашење електричног лука, тј. медијума за гашење на: уљне, малоуљне,

пнеуматске, вакумске и SF<sub>6</sub> прекидаче. Погонски механизам прекидача може бити опружни, пнеуматски и хидраулични.

Високонапонски прекидач је током експлоатације изложен различитим врстама напрезања, при чему се његов животни век скраћује. Правилним избором одговарајућих дијагностичких метода активности одржавања могу се прилагодити стварном стању прекидача. Дијагностичке методе испитивања високонапонских прекидача су:

- мерење отпорности изолације,
- провера: диелектричне чврстоће уља, степена вакума или густине гаса SF<sub>6</sub>,
- провера положаја контаката у стању отворено – затворено,
- провера хода контаката снимањем дијаграма простор – време,
- мерење струје калема за укључење и искључење,
- мерење времена стартовања погонског механизма и
- провера броја операција и мерење контактне отпорности.

На животни век прекидача највећи утицај имају број склопних операција и величине струја при прекидима кратких спојева. Животни век прекидача је за различите типове прекидача другачији [34]:

- пнеуматски прекидачи:
  - $41 \pm 6$  година ( $110 \text{ kV} < U_n < 345 \text{ kV}$ )
  - и  $40 \pm 6$  година ( $345 \text{ kV} < U_n$ )
- уљни прекидачи:
  - $42 \pm 6$  година ( $110 \text{ kV} < U_n < 199 \text{ kV}$ ),
  - $41 \pm 6$  година ( $200 \text{ kV} < U_n < 275 \text{ kV}$ ) и
  - $38 \pm 5$  година ( $345 \text{ kV} < U_n$ )
- SF<sub>6</sub> прекидачи:
  - $43 \pm 6$  година ( $110 \text{ kV} < U_n < 199 \text{ kV}$ ),
  - $42 \pm 6$  година ( $200 \text{ kV} < U_n < 275 \text{ kV}$ ) и
  - $42 \pm 6$  година ( $345 \text{ kV} < U_n$ ).

Дозвољени број склопних операција варира од типа прекидача, а максимални број операција ( $n_o$ ) се утврђује механичким тестовим и износи до 10000 [58]. Такође је битна и величина струје која се прекида, па се поред броја комутација често бележи и кумулативна струја искључења. Кумулативна струја је веома корисна

јер похабаност контаката прекидача као и стање медијума за гашење електричног лука веома зависе од ње. Број операција се пре свега меморише ради утврђивања механичких оштећења контактних површина полова које се оштећују при сваком склапању прекидача. При томе, степен оштећења контаката зависи од топлотног импулса, па оштећење расте с квадратом струје коју полови прекидају. Животни век прекидача у највећој мери зависи од броја искључења струја кратког споја. Сваки прекидач мора да задовољи следећи апроксимирани услов:

$$\sum n \cdot I_{ks}^2 \leq 20000 \quad (2.4.1)$$

где је  $n$  – број прекинутих струја, а  $I_{ks}$  – струја кратког споја у [кА]. Старење, хабање контаката и корозија стварају 50% неуспешног реаговања прекидача. Лоши контакти лако се уочавају термовизијским прегледом, што је и основа дијагностике разматране у дисертацији. Повећање отпорности контаката доводи до повећаног загревања и топлих места на прекидачу који се идентификују температурама прегревања. Мерење контактне отпорности ( $R_k$  [ $\mu\Omega$ ]) се врши пре свега помоћу једносмерне струје за све три фазе. Уобичајан начин да се отпорност процени јесте да се пореди са вредностима од преостале две фазе. Ако одступање ( $\Delta R_k$ ) прелази вредност од 50% потребно је извршити поправку прекидача. Ово мерење представља мерење отпорности главног струјног круга и кључно је за провођење струје у затвореном положају.

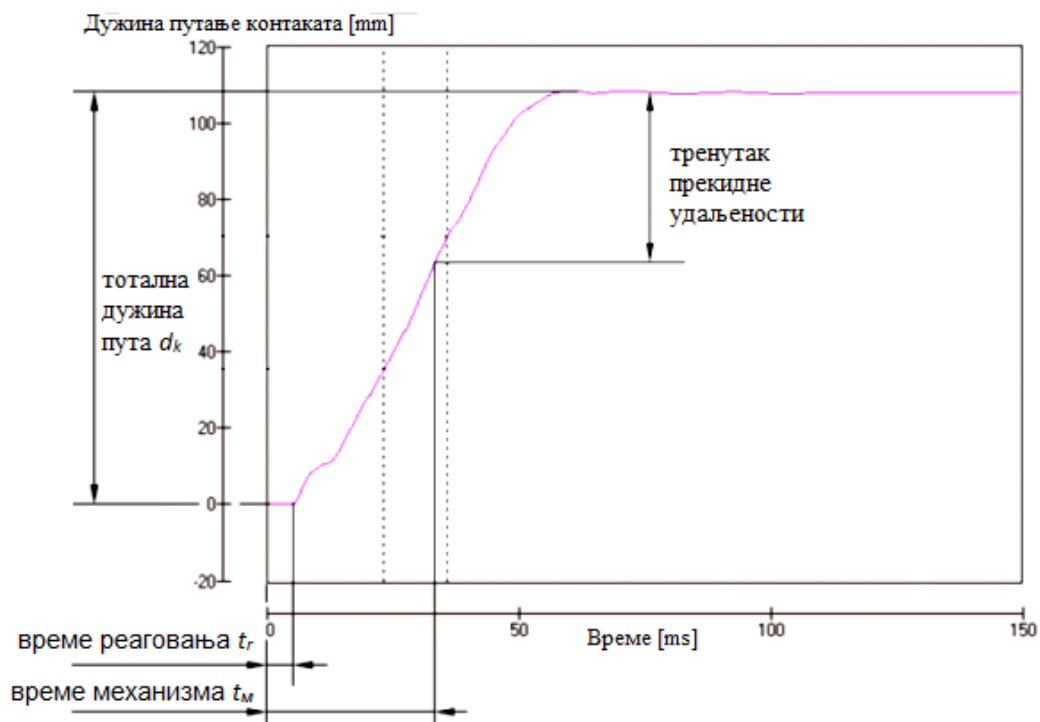
Због малог броја кварова изолације прекидача дијагностика се не бави том проблематиком, па се мерења повратног напона и  $tg\delta$  у пракси готово и не примењују. Пуно више пажње се посвећује испитивању изолационих карактеристика медијума за гашење електричног лука [40], [43]. Најсавременији прекидачи јесу  $SF_6$  прекидачи па се као медијум за гашење разматра  $SF_6$  гас. У дисертацији је представљена дијагностика стања прекидача која се односи на  $SF_6$  гас као медијум за гашење електричног лука. Главне карактеристике гаса су: концентрације влаге и ваздуха у  $SF_6$  гасу, густина гаса, диелектрична чврстоћа гаса, температура и притисак гаса. Ове карактеристике су међусобно зависне, а уређаји са сензорима који су развијени за мониторинг карактеристика  $SF_6$  гаса мере његову температуру, притисак и цурење гаса. Опсег могућих вредности температуре гаса ( $\theta_{SF_6}$ ) је од  $-30$  °C до  $100$  °C [36]. Доња и горња гранична вредност температуре је  $-40$  °C и  $110$  °C. Дозвољено цурење гаса ( $\Delta p$ ) се креће у

граница 0,5% до 1% по години [36]. Овакав губитак гаса је последица несавршености заптивености коморе за гашење лука. За локализацију места цурења користи се најчешће термовизијски преглед који омогућава да се за кратко време претраже веће површине не прескачући ниједан део инсталација гаса. Притисак гаса ( $p$ ) се мери манометром и његов нормални опсег је од 6,25 bara до 7,77 bara. Граничне вредности притиска су 5,98 и 8,05 bara [35]. Провера цурења и притиска гаса се директно односи на проверу заптивености коморе прекидача. Горња граница притиска  $SF_6$  гаса у комори за гашење лука је ограничена процесом кондензације  $SF_6$  гаса. При сувише великом притиску  $SF_6$  гас прелази у течно стање па нема способност да угаси лук. За разлику од манометра, денсиметар је неосетљив на промену притиска услед температуре. Температурна компензација је остварена тако што се уместо директног поређења притиска као код манометра, код денсиметра пореди густина ( $\rho$ )  $SF_6$  гаса која се креће у опсегу  $45 \div 50 \text{ kg/m}^3$ .

Најчешћи кварови на прекидачу нису дефекти изолације већ механички кварови и кварови у управљачким колима. Најчесталији квар прекидача јесте отказ калема за укључење или искључење, па се његовом мониторингу највише пажње и посвећује. На основу тога погонски механизам прекидача је уједно и најбитнији део прекидача са аспекта поузданости. Снимањем хода контаката, ходограма, проверава се функционалност погонског механизма. Анализа самог ходограма се заснива на поређењу снимљених крива са референтним кривама исправног прекидача. При овом поређењу не постоји ниједна квантитативна величина за поређење осим субјективног визуелног прегледа. Да би се узео у обзир утицај испитивања ходограма на укупно стање прекидача, разматра се дужина путање положаја контаката и једновременост полова прекидача. Удаљеност коју контакт прелази за време комплетне склопне операције затварања се може израчунати на основу снимљеног ходограма и познавања брзине контаката. Сензори који мере брзину контаката ( $v_k$  [m/s]) се уграђују у уређаје за *on-line* мониторинг. Доња и горња гранична брзина склопне операције су 3,1 m/s и 5,6 m/s. Границе дозвољене дужине пута контаката ( $d_k$  [mm]) су 190 mm и 213 mm. Уколико се време искључења једног пола убрза или обрнуто време искључења друга два пола повећа због механичког узрока, најбржи пол ће трпети дужа

диелектрична напрезања услед фактора првог пола чиме се повећава вероватноћа поновних паљења лука. Једновременост између полова се проверава симултаним мерењем времена искључења и укључења сва три пола. Једновременост при искључењу је важнија него при укључењу. Дозвољена времена расипања ( $\Delta t$  [ms]) између полова прекидача зависе од произвођача [41]. За произвођача Сименс (*Siemens*) дозвољено време расипања је 3 ms при искључењу и 2 ms при искључењу прекидача, док код произвођача Арева (*Areva*) 5 ms и 3 ms, ретроспективно. За најкритичнију вредност у оба случаја склопне операције је изабрано минимално дозвољено одступање од 2 ms. Извор енергије за покретање механизма прекидача је потенцијална енергија акумулирана у опругама моторно опружног погона. Основни задатак моторно опружног погона је и да обезбеди пренос енергије из опруге на контакте да би се они отвараили и затварали у декларисаном времену, тј. према дизајнираним брзинама. Превелико време искључења за последицу има спорије успостављање диелектричне чврстоће међуконтактног простора, што повећава вероватноћу поновног паљења лука. Свако веће одступање у времену укључења или искључења од пројектованог, номиналног, времена је први индикатор да постоји поремећај у механичком раду прекидача, који за последицу има неисправно гашење лука [4]. Повећана времена укључења и искључења прекидача указују на мањак енергије у опругама, важи и обрнуто. Превелика енергија у опругама ствара већа механичка напрезања прекидача. При укључењу и искључењу главни контакти ће се сударати, односно заустављати под дејством великих сила које пригушни механизми неће моћи да апсорбују. Мање енергије у опругама прекидача значи мању прекидну моћ прекидача. Спора времена укључења и искључења прекидача могу бити и последица спорог одзива неког од делова механизма опружног погона прекидача. Времена склопних операција су такође у директној вези са ходограмом контаката. Уз помоћ снимљеног ходограма и брзине контаката могуће је прорачунати и време реаговања ( $t_r$  [ms]) прекидача. Време реаговања представља време од реакције опруге до почетка померања контаката прекидача. Минимално дозвољено време реаговања прекидача је 1 ms, а максимално 19 ms. Време које се такође дефинише је време механизма ( $t_m$  [ms]) прекидача. Време механизма је време које протекне од реакције опруге до сретања лучних контаката. Овај

тренутак се назива и тренутак прекидне удаљености (Сл. 2.4.1). Прекидна удаљеност се дефинише као удаљеност на ходограму за време које су лучни контакти састављени, а главни контакти одвојени. Дозвољен опсег времена механизма је од 51 до 76 ms. Време натењања опруге ( $t_o$  [ms]) се такође мери и нормални опсег вредности је од 18 ms до 40 ms [40].



Сл. 2.4.1 Снимљена крива ходограма при затварању контаката [35]

Све граничне вредности дефинисаних времена су за операцију затварања контаката. Време укључења је увек веће од времена искључења јер се механизму за укључење супротставља опруга за искључење прекидача и пригушни механизам прекидача који треба да апсорбује велику енергију при заустављању контаката прекидача приликом укључења. Основни захтевани циклус склопних операција од прекидача је О-0,3s-С-О: искључење (О) – 0,3s пауза – укључење (С) – искључење (О). Дозвољена одступања операционих времена која су прописали произвођачи за високонапонске прекидаче су:

- Сименс (*Siemens*) – дозвољено одступање је  $\pm 7$  ms при укључењу прекидача и  $\pm 3$  ms при искључењу прекидача,
- Арева (*Areva*) – дозвољено одступање је  $\pm 10$  ms при укључењу прекидача и  $\pm 3$  ms при искључењу прекидача и



- АББ (*ABB*) – дозвољено одступање је  $\pm 2$  ms при искључењу док се за укључење декларише само максимално време од 70 ms.

Гранична вредност дозвољених одступања времена операције укључења ( $\Delta t_{ON}$  [ms]) изабрана је  $\pm 7$  ms, а искључења ( $\Delta t_{OFF}$  [ms])  $\pm 2$  ms. Ове вредности су изабране као критичнији случајеви чијим се одабиром стварају граничне вредности на страни сигурности. У Таб. 2.4.1 су систематично приказани параметри и њихове граничне вредности које су узете у обзир код формирања фази модела прекидача.

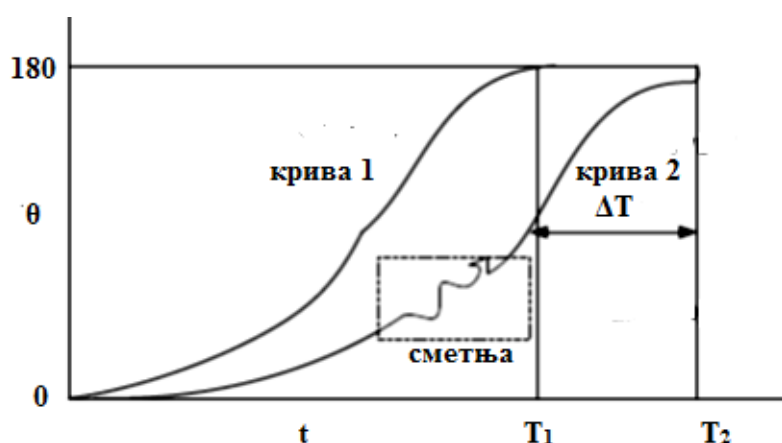
Таб. 2.4.1 Оријентационе граничне вредности параметара који су коришћени за одређивање стања прекидача

Параметар	Гранична вредност	Параметар	Гранична вредност
$n_o$	10 000	$v_k$ [m/s]	3,1 и 5,6
$\Sigma n \cdot I_{ks}^2$ [A <sup>2</sup> ]	20 000	$d_k$ [mm]	190 и 213
$\Delta R_k$ [%]	50	$\Delta t$ [ms]	2
$\Theta_{SF6}$ [°C]	-40 и 100	$t_r$ [ms]	1 и 19
$\Delta p$ [%]	1	$t_m$ [ms]	51 и 76
$p$ [bar]	5,98 и 8,05	$t_o$ [ms]	18 и 40
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	45 и 50	$\Delta t_{ON}$ и $\Delta t_{OFF}$ [ms]	$\pm 7$ и $\pm 2$

## 2.5. Растављач

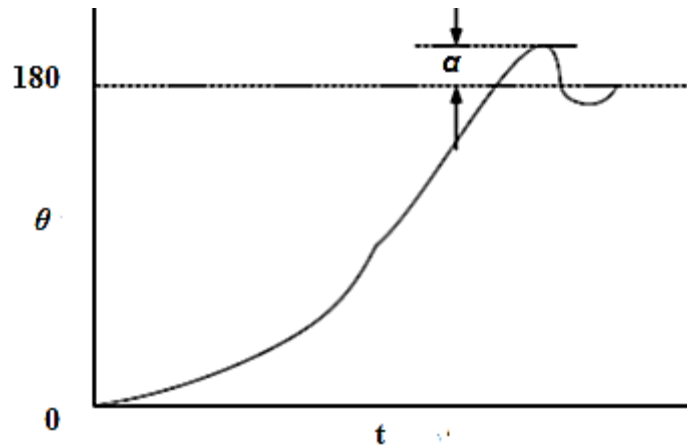
Растављач је расклопни елемент ЕЕС-а који служи за видно и сигурно прекидање високонапонских кола ЕЕС-а. Растављач има могућност да прекине струје празног хода ЕТ-а и краћих водова, али не може да врши функцију прекидача. За уземљење појединог дела разводног постројења служе земљоспојници који су често механички везани с растављачима па чине конструкцијску целину. У просеку, у разводним постројењима је дупло више растављача од прекидача, јер они служе за видно секционисање делова постројења. Као такви, растављачи нису толико битни као прекидачи али због своје многобројности свакако доста утичу на свеукупну поузданост разводног постројења.

Основни индикатор стања растављача као и код друге расклопне висонапонске опреме јесте животни век и број склопних операција ( $n_o$ ). У [34] животни век растављача се процењује на 40 година са стандардном девијацијом од  $\pm 7$  година. Према произвођачима [59] расклопне опреме, очекивани број склопних операција које растављач треба да обави је између 10000 и 20000. Како збирни број склопних операција растављача расте, све је већа шанса за квар растављача. Постоје четири основна типа квара који се јављају код растављача [36], [5], [46]: запрљање изолатора, прегревање контакта, унутрашњи кварови изолатора и сметње код покретних делова. Најчешћи кварови и узроци других кварова су механичког типа, који настају услед лошег подмазивања лежајева и других делова покретног система. Већина механичких кварова се може лако детектовати помоћ снимања криве функције ( $f=\theta(t)$ ) угла ротације лежајева у времену (Сл. 2.5.1). Овако снимљене криве су сличне ходографу код прекидача. Прва крива представља снимак новог растављача при његовом првом активирању, а време  $T_1$  је укупно време операције које одговара тој криви. Друга крива и време операције  $T_2$  је снимљено за растављач који је у експлоатацији и има сметње код покретних делова. Просечно време операције високонапонских растављача је између 70 и 90 ms [44]. Разлика времена операције  $T_1$  и  $T_2$  је  $\Delta T$  и представља важан параметар чија величина директно указује на механичке проблеме склопне операције. Оријентациона гранична вредност за  $\Delta T$  је 15 ms, и уколико ова вредност расте, квар растављача је све озбиљнији.

Сл. 2.5.1 Крива  $\theta = f(t)$  [44]

Уколико је угао ротације ( $\theta$ ) мањи од 180 степени, онда растављач прерано зауставља покретне делове. Ако је угао ротације већи од 180 степени, растављач

прекасно зауставља своје покретне делове (Сл. 2.5.2). Индикатор величине прераног или прекасног заустављања покретних делова је угао  $\alpha$ . Ако је  $\alpha$  већи од  $5^\circ$ , онда дефинитивно постоји квар растављача.

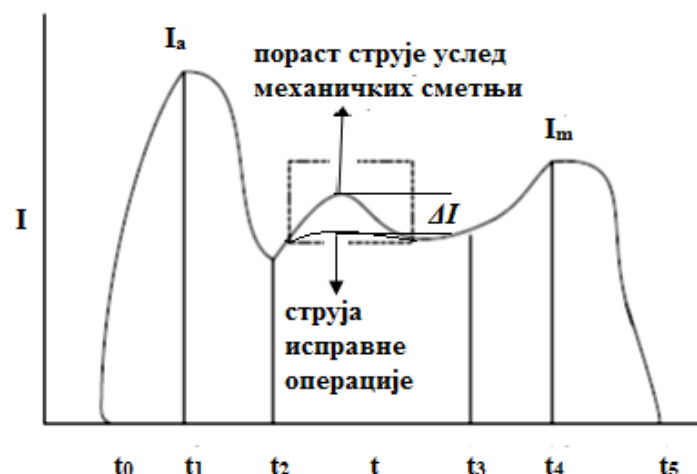


Сл. 2.5.2 Крива  $\theta = f(t)$  са прескоком угла ротације [44]

Још један начин да се сагледа стање растављача јесте снимање струје индукционог мотора [45] који покреће опружни механизам растављача. Струјним трансформатором се снима временска зависност струје индукционог мотора који врши своју функцију (Сл. 2.5.3). Назначена времена на Сл. 2.5.3 имају следеће значење:

- $t_0 - t_1$ : покретање мотора када постоји велика стартна струја  $I_a$ ,
- $t_1 - t_2$ : мотор почиње да ротира, мотор генерише електромоторну силу и уочљив је пад струје,
- $t_2 - t_3$ : мотор је постао стабилан.
- $t_3 - t_4$ : фиксни контакти се спајају са покретним контактима и долази до повећања оптерећења, услед чега долази до пораста струје на вредност  $I_m$  и
- $t_5$ : мотор је завршио своју функцију и јавља се пад струје.

На Сл. 2.5.3 се може видети пораст струје  $\Delta I$  у временском временском периоду  $t_2 - t_3$  када постоји механичка сметња растављача. У том периоду је мотор стабилан и не би требало да дође до повећања струје. Међутим, услед отежане механичке операције јавља се повећање струје чија је дозвољена оријентациона гранична вредност 5% од вредности струје  $I_a$ . Сигнали из сензора за ротирајући угао и струјног трансформатора се снимају *on-line* и могу да укажу на основни недостатак или потенцијалне мане механичког погонског система растављача.



Сл. 2.5.3 Зависност струје мотора растављача од времена [44]

Таб. 2.5.1 Збирни приказ расподеле топлих места по опреми и години испитивања разводних постројења у оквиру ЈП ЕМС

Година	Прекидач	Растављач	Струјни трансформатор	Енергетски трансформатор	Остало
<b>1996.</b>	96	364	126	19	133
<b>1997.</b>	170	503	211	29	101
<b>1998.</b>	127	505	197	31	90
<b>1999.</b>	111	415	113	20	110
<b>2000.</b>	76	227	84	9	54
<b>2001.</b>	79	383	117	19	14
<b>2002.</b>	122	443	183	14	126
<b>2003.</b>	105	339	196	16	120
<b>2004.</b>	155	454	216	21	143
<b>2005.</b>	115	450	200	24	145
<b>2006.</b>	135	539	190	27	134
<b>2007.</b>	90	467	185	27	149
<b>2008.</b>	82	357	127	21	119
$\Sigma$	1463	5446	2145	244	1438

Прегревања настају услед запрљања и хабања контаката. Термовизијом, која је уједно и полазна метода испитивања у дисертацији, најчешће се откривају топла места код растављача (Таб. 2.5.1). Дакле, температура прегревања топлог

места је свакако битан индикатор за стање растављача. Битан индикатор је и температура прегревања при претходном термовизијском испитивању, јер указује на брзину развијања квара. У Таб. 2.5.2 се може видети да је највећи број поновљених топлих места управо присутан баш код растављача. Највећи број топлих места се јавља на напонском нивоу 110 кV. У Таб. 2.5.1 и Таб. 2.5.2 се може видети и број топлих места за прекидаче, енергетске и мерне трансформаторе.

Таб. 2.5.2 Распоред поновљених топлих места по апаратима, напонском нивоу и години испитивања

Апарат	2001.				2002.			
	400	220	110	35	400	220	110	35
Прекидач	2	5	2	1	2	10	3	1
Растављач	5	8	40	3	8	16	39	8
Струјни трансформатор	2	1	9			6	4	12
Енергетски трансформатор		3					1	2
Остало	1	5	3	8			2	12
Укупно	10	22	54	12	10	32	49	35

### 3. МЕТОДА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ СТАЊА ВИСОКОНАПОНСКЕ ОПРЕМЕ НА БАЗИ ФАЗИ ТЕОРИЈЕ

#### 3.1. Опис и алгоритам методе

Главни допринос ове дисертације јесте формирање фази експертских система за мониторинг и дијагностику прекидача, растављача, енергетског и мерног трансформатора, као и примена њихових резултата у прорачуну поузданости високонапонског разводног постројења. Сам прорачун поузданости користи резултате експертских система и врши операције са фази бројевима који су естимирани из вредности променљивих у прорачуну. Резултати прорачуна поузданости се примењују код мапе ризика и индекса перформанси система. Опис овакве методе је представљен кроз алгоритам приказан на Сл. 3.1.1.

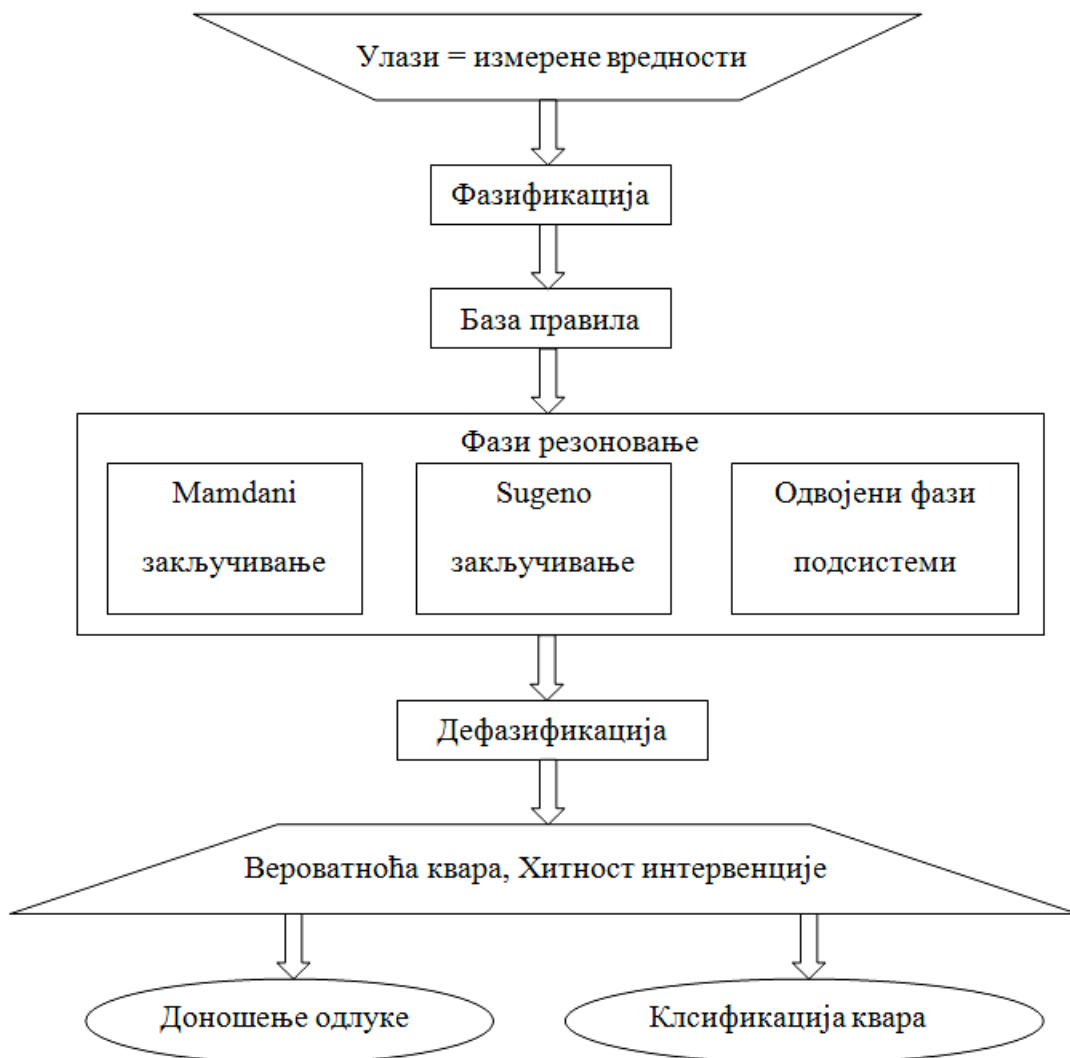


Сл. 3.1.1 Алгоритам методе за дијагностику стања и анализу поузданости на бази фази теорије

Сврха примене експертских система и метода јесте правовремено и правилно доношење одлука везаних за одржавање разводних постројења и високонапонске опреме у њима. Доношење одлуке, као што се може видети у алгоритму, јесте могуће на основу:

- резултата фази експертских система високонапонске опреме,
- мапе ризика и
- индекса перформансе система (*SPI*).

Доношење одлуке се односи на саму високонапонску опрему, делове разводног постројења и комплетно разводно постројење. Такође, осим одлуке о одржавању на основу *SPI*, може се донети одлука о реконфигурацији разводног постројења.



Сл. 3.1.2 Алгоритам примене фази теорије код методе за дијагностику стања опреме

Прорачун поузданости разводног постројења користи резултате експертских система, па је у овом поглављу детаљно обрађено формирање фази модела стања ЕТ-а, СМТ-а, прекидача и растављача. Основни делови поступка формирања фази експертског система су приказани на Сл. 3.1.2. Најбитнији делови алгоритма су: фазификација, формирање базе правила, одабир типа резоновања (закључивања) и добијање резултата кроз дефазификацију. Поменути поступци су теоријски објашњени кроз Прилог 1 – Фази теорија у докторској дисертацији. Имплементирање самих поступака је објашњено на примеру ЕТ-а.

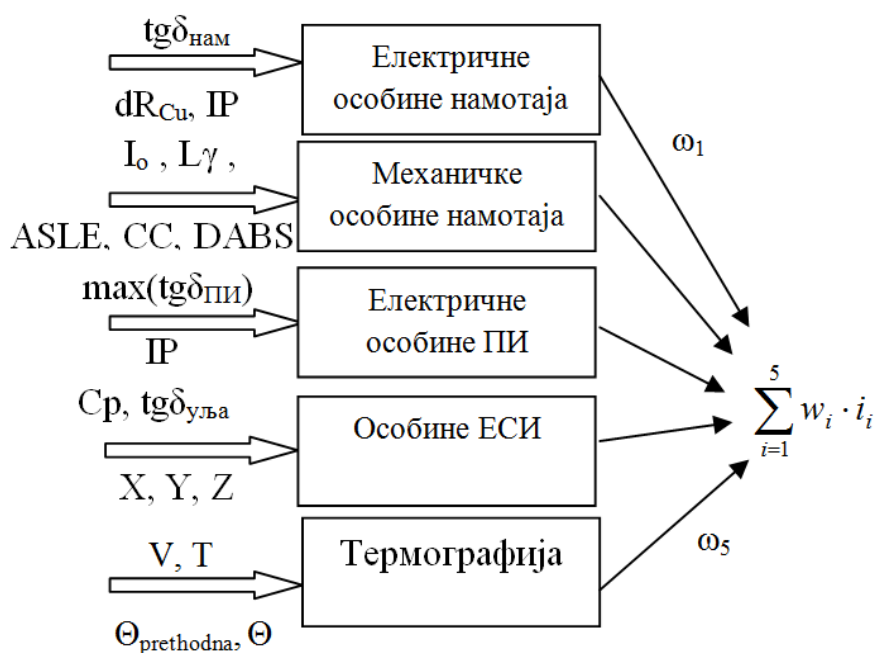
### 3.2. Фази експертски систем за енергетски трансформатор

У поглављу 2.2 су представљени најчешће мерени параметри који су најрелевантнији показатељи стања ЕТ-а. На основу статистике кварова код ЕТ-а и на основу врсте кварова на које указују набројани параметри, експертски систем ЕТ-а је подељен на неколико подсистема који се односе на: електричне особине намотаја, механичке особине намотаја, електричне особине проводних изолатора (ПИ), хемијске и електричне особине електроизолационог система (ЕСИ) и термографску слику. Оваквих пет експертских подсистема са својим излазима уједно указују на стање и на вероватноћу настанка квара на појединим деловима ЕТ-а (Сл. 3.2.1). Излази сваког експертског подсистема се множе са тежинским факторима ( $\omega_i$ ). Излази помножени са тежинским факторима се сабирају и деле са бројем фази подсистема и на тај начин се добија коначни излаз. Ако тежински фактори узимају сви вредност један, онда је свих пет подсистема подједнако важно. Одабиром вредности тежинских фактора могуће је појачати неки од излаза подсистема и тако дати на важности конкретном делу ЕТ-а. Појачањем тежинских фактора одређеног подсистема, одговарајући део ЕТ-а има већи удео у комплетном стању ЕТ-а.

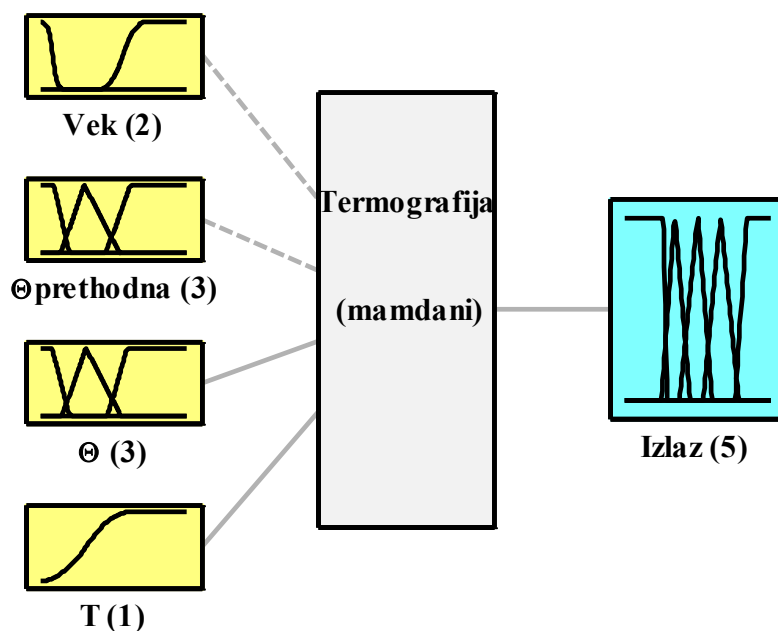
Фази експертски подсистем за термографију ЕТ-а (Сл. 3.2.2) има за улазе:

- животни век ЕТ-а ( $V$ ),
- температуру прегревања при претходној термографији ( $\theta_{\text{претходна}}$ ),
- температуру прегревања актуелне термографије ( $\theta$ ) и
- температуру изолације  $T$ .





Сл. 3.2.1 Експертски систем ЕТ-а са пет фази експертских подсистема

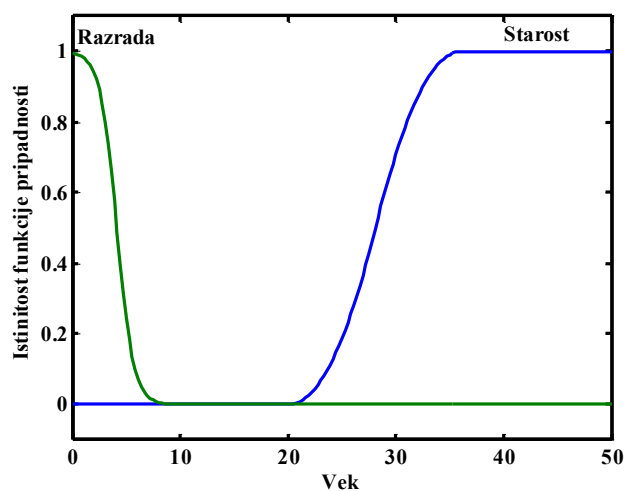


Сл. 3.2.2 Фази експертски подсистем за термографију ЕТ-а са својим улазима

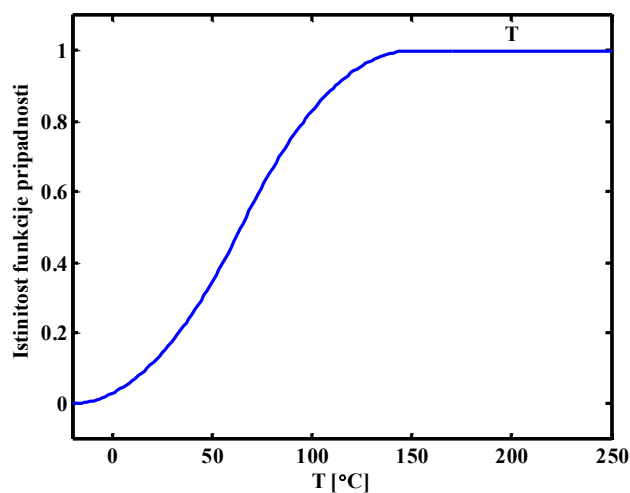
У складу са описаним алгоритмом методе примене фази логике (Сл. 3.1.2) први корак у креирању фази експертског система је фазификација улаза и излаза. Фазификација улаза животни век садржи две функције припадности које се односе на период разраде ЕТ-а и период старења. Оваква фазификација (Сл. 3.2.3) је у директној вези са када (*bath*) кривом (Сл. 2.1.1) која указује на учестаност кварова код елемента у зависности од свог животног доба. На Сл. 3.2.3 се јасно види да је истинитост функције припадности разрада већи уколико је животни век ЕТ-а мањи. Исто важи и за функцију припадности старост која је тачнија ако ЕТ има више година у експлоатацији. Животни век је у експоненцијалној корелацији са температуром изолације (2.2.8 и 2.2.9), па је фазификација улаза  $T$  представљена на слици Сл. 3.2.4. Уколико је температура изолације виша, онда је ЕТ угроженији и животни век му се скраћује. У основи доктората јесте идеја да три опсега температуре прегревања ( $10\text{ °C} < \theta$ ;  $10\text{ °C} - 30\text{ °C}$ ;  $\theta > 30\text{ °C}$ ) нису довољна за дијагностику стања ЕТ-а након извршене термографије. Стога је узета у обзир температура претходног прегревања, животни век и температура изолације. У складу са опсезима вредности прегревања представљене су функције припадности на Сл. 3.2.5 и Сл. 3.2.6. Све три функције припадности се преклапају, чиме је узета у обзир мерна несигурност и утицај различитих амбијенталних и радних услова при мерењу. Излаз фази експертског подсистема је представљен помоћу пет функција припадности (Сл. 3.2.7) које су у вези са порукама о потребним интервенцијама на ЕТ-у. Излази свих фази експертских система су у опсегу од 0 до 1 или од 0% до 100% вероватноће квара. Хитнија интервенција на високонапонској опреми означава већу вероватноћу квара, тј. већу вредност излаза. Овакав принцип је примењен на свим креираним експертским системима. Наредни корак у алгоритму јесте формирање базе правила. Најпростије и најлогичније правило у бази би било:

„Ако је елемент стар, при крају радног века, и ако је температура прегревања преко  $30\text{ °C}$ , и ако је температура претходног прегревања преко  $30\text{ °C}$  и ако је висока температура изолације онда је јасно да је потребна ХИТНА интервенција“.

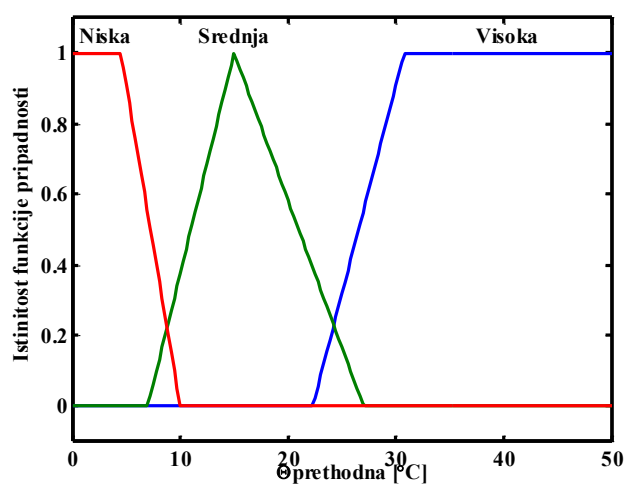
Ређањем правила формира се база правила која се користи код фази резоновања. База правила се формира за сваки фази експертски подсистем и систем.



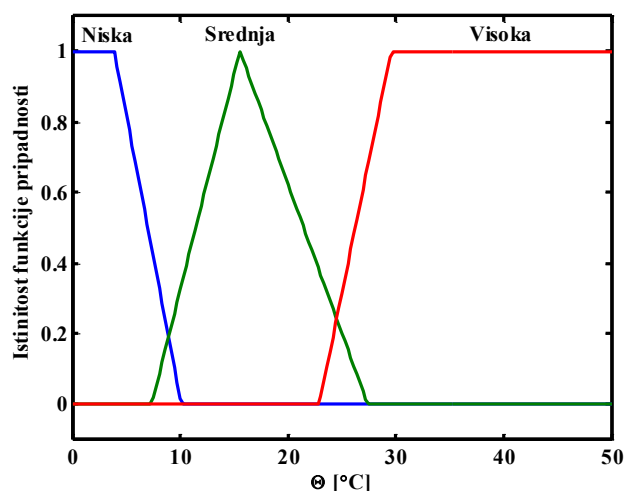
Сл. 3.2.3 Функције припадности за улаз век ЕТ-а



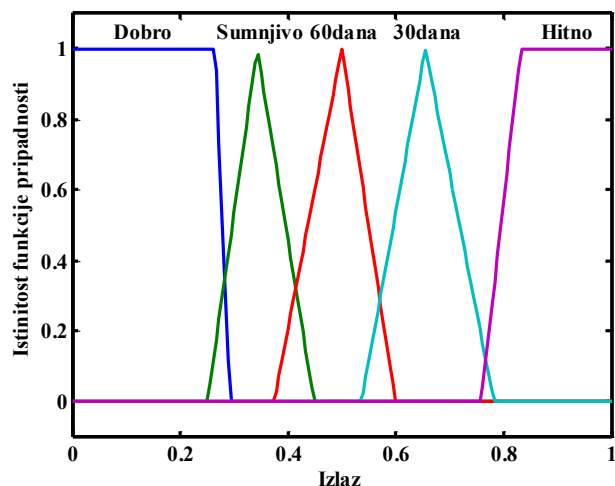
Сл. 3.2.4 Функције припадности за улаз  $T$  изолације ЕТ-а



Сл. 3.2.5 Функције припадности за улаз  $\theta_{\text{претходна}}$



Сл. 3.2.6 Функције припадности за улаз  $\theta$



Сл. 3.2.7 Функције припадности за излаз фази подсистема за термографију ET-a

Правила се формирају тако да буду логична и у складу са табелама везаним за тумачење вредности улазних параметара. Најчешће ситуације које се јављају код мониторинга високонапонске опреме указују да је већина посматраних параметара лоша, критична, или већина указује на добро стање опреме. Ипак постоје ситуације које су двосмислене и оне треба да буду обухваћене кроз базе правила. База правила за фази подсистем термографије је приказана у Таб. 3.2.1. Базе правила за све остале фази експертске системе су дате у Прилог 2 – Табеле база правила. Следећи корак алгоритма примене фази логике је дефазификација која генерише коначни резултат система. Код свих експертских система је примењена најчешће коришћена метода дефазификације COG ( Прилог 1 – Фази

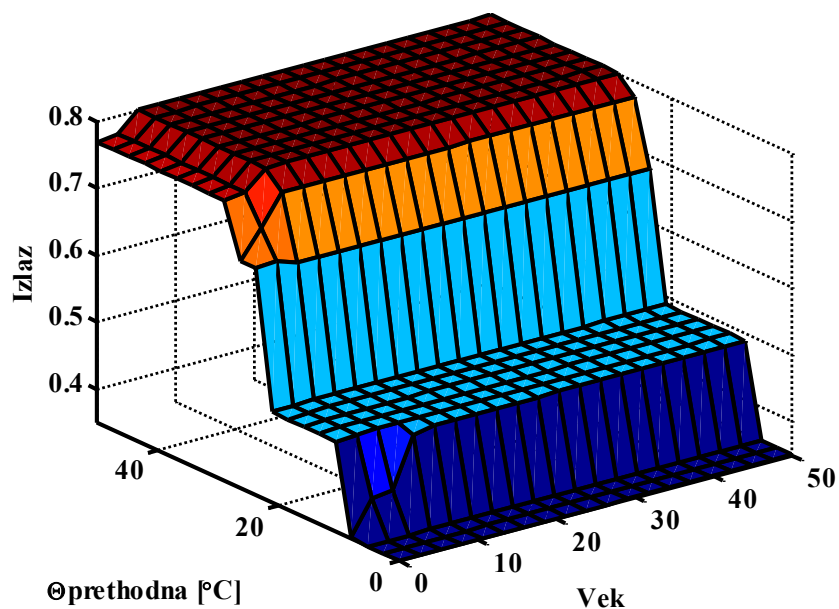
теорија). Дефазификција генерише реалан број из опсега 0 до 1. Већа вредност овог броја указује на лошије стање опреме и потребну хитнију интервенцију. Такође, у случају посматрања резултата подсистема може се уочити који део разматране опреме је у лошијем стању. На основу поређења излаза доноси се одлука која високонапонска опрема у разводном постројењу захтева хитнију интервенцију. Поступак алгоритма на Сл. 3.1.2 је аналоган за све формиране фази експертске системе и подсистеме. Стога у даљем тексту су наглашене само табеле које су у вези са фазификацијом и базом правила.

Таб. 3.2.1 База правила за фази експертски подсистем за термографију ЕТ-а

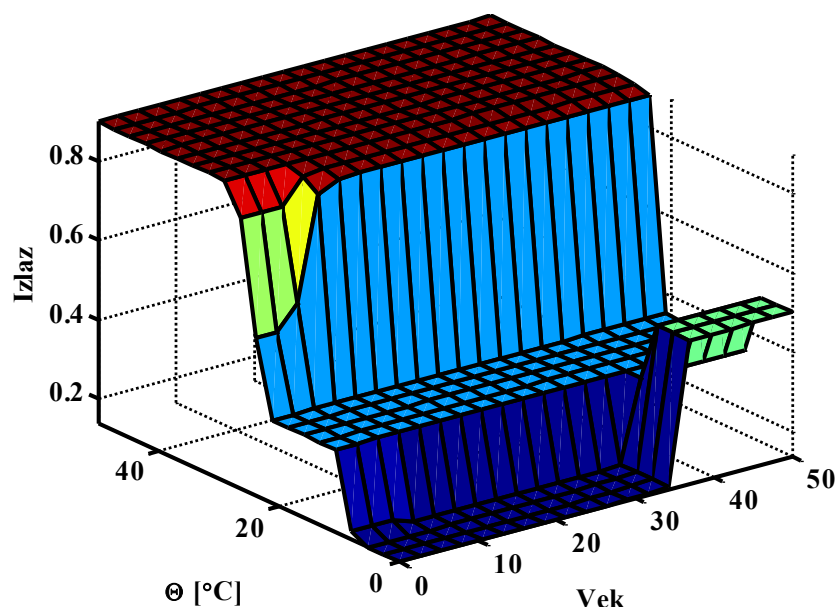
1. If ( <i>Vek</i> is not <i>Starost</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Niska</i> ) and ( $\theta$ is <i>Niska</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>Dobro</i> ) (1)
2. If ( <i>Vek</i> is <i>Razrada</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Niska</i> ) and ( $\theta$ is <i>Srednja</i> ) and ( <i>T</i> is <i>T</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>Sumnjivo</i> ) (1)
3. If ( <i>Vek</i> is not <i>Razrada</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Srednja</i> ) and ( $\theta$ is <i>Srednja</i> ) and ( <i>T</i> is <i>T</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>60 dana</i> ) (1)
4. If ( <i>Vek</i> is not <i>Razrada</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Visoka</i> ) and ( $\theta$ is <i>Srednja</i> ) and ( <i>T</i> is <i>T</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>30 dana</i> ) (1)
5. If ( <i>Vek</i> is not <i>Razrada</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Visoka</i> ) and ( $\theta$ is <i>Visoka</i> ) and ( <i>T</i> is <i>T</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>Hitno</i> ) (1)
6. If ( <i>Vek</i> is <i>Starost</i> ) and ( $\theta_{prethodna}$ is <i>Visoka</i> ) and ( $\theta$ is <i>Visoka</i> ) and ( <i>T</i> is <i>T</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>Hitno</i> ) (1)
7. If ( $\theta$ is <i>Visoka</i> ) then ( <i>Izlaz</i> is <i>Hitno</i> ) (1)

Резултати и принцип рада задате базе правила могу бити сагледани кроз тродимензионалну представу где се приказује зависност излаза експертског система од његових изабраних улаза. Оваква представа представља преносну функцију између улаза и излаза експертског система. За базу правила (Таб. 3.2.1) експертског подсистема за термографију приказане су: зависност излаза од животног века и претходне температуре прегревања (Сл. 3.2.8) и зависност излаза од животног века и температуре прегревања (Сл. 3.2.9). Са поменутих слика јасно се може видети да, ако је елемент старији, вероватноћа квара, тј. вредност излаза расте. Такође, ако су претходна и садашња температура топлог места више, онда је хитност интервенције већа, тј. вредност излаза расте. На основу оваквих слика

може се закључити да је формирана база адекватна. Базу правила је могуће модификовати у складу са теренским условима рада ЕТ-а као и са типом ЕТ-а ради добијања што реалистичнијих резултата.



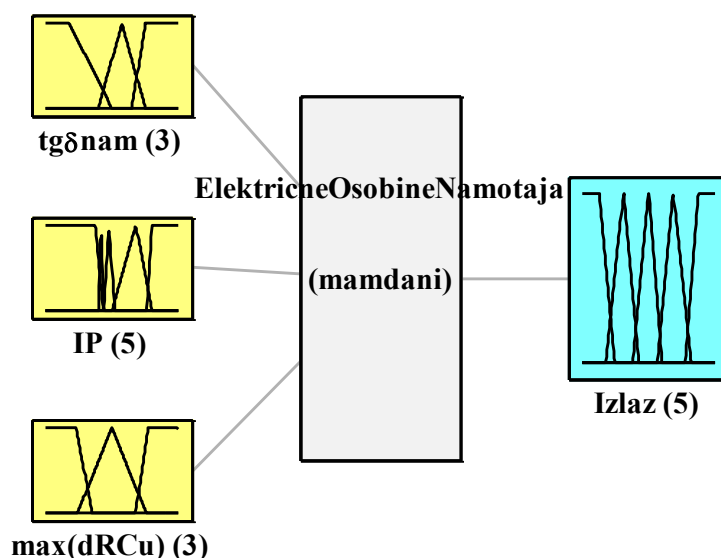
Сл. 3.2.8 Зависност излаза од животног века и претходне температуре прегревања, за  $\theta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T=115\text{ }^{\circ}\text{C}$



Сл. 3.2.9 Зависност излаза од животног века и актуелне температуре прегревања, за  $\theta_{\text{претходно}}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

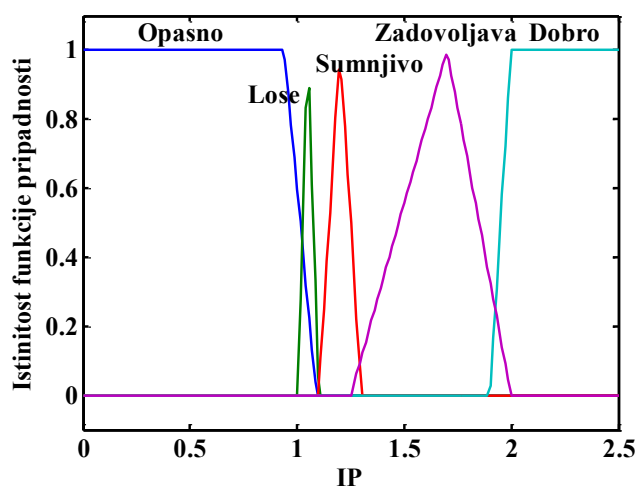
Фази експертски подсистем за електричне особине намотаја ЕТ-а (Сл. 3.2.10) има за улазе:

- вредност индекса поларизације  $IP$ ,
- вредност вредност  $tg\delta$  намотаја  $tg\delta_{нам}$  и
- маскимална вредност релативне међуфазне разлике отпорности намотаја за различита стања регулатора напона  $\max(dR_{Cu})$ .

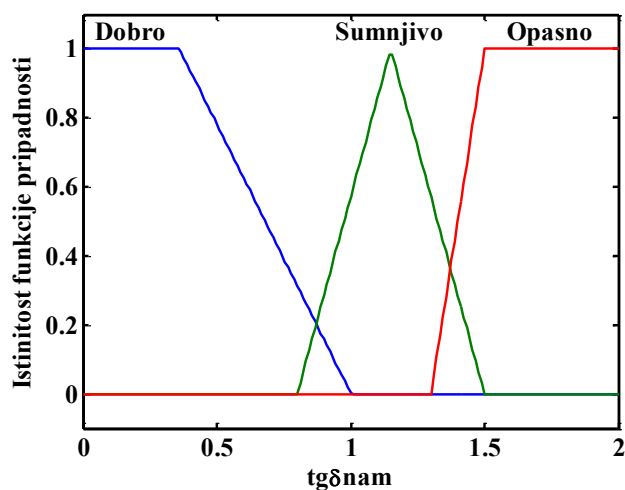


Сл. 3.2.10 Фази експертски подсистем за електричне особине намотаја ЕТ-а са својим улазима

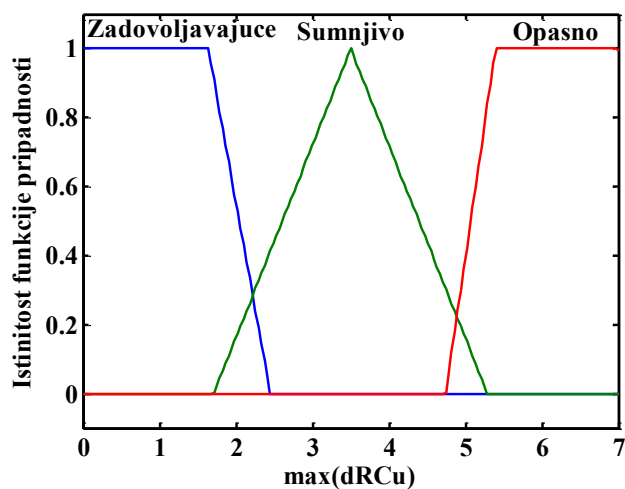
Фазификација улаза  $IP$  у складу са Таб. 2.2.2 подразумева увођење пет функција припадности (Сл. 3.2.11) које су у вези са опсезима вредности параметра из табеле. На Сл. 3.2.12 су приказане функције припадности улаза  $tg\delta_{нам}$  које су у вези са Таб. 2.2.3, а на Сл. 3.2.13 је представљена фазификација улаза  $\max(dR_{Cu})$  која је у вези са Таб. 2.2.6. Излаз фази експертског система за електричне особине намотаја и проводног изолатора је исти и представљен је помоћу пет функција припадности као на Сл. 3.2.14. База правила за овакву фазификацију представљена је у Таб. П. 0.1.



Сл. 3.2.11 Функције припадности за улаз  $IP$

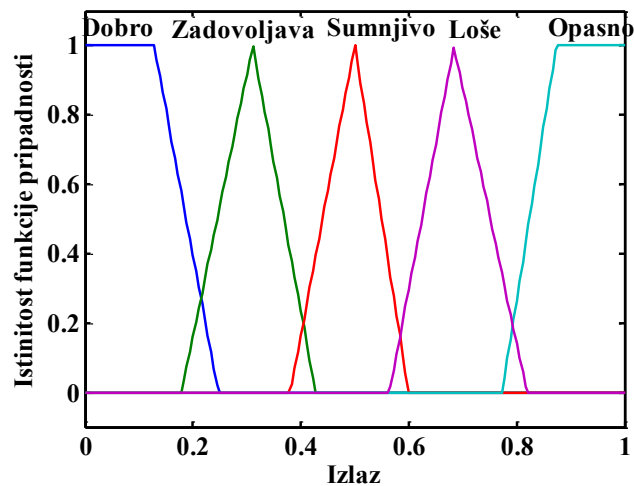


Сл. 3.2.12 Функције припадности за улаз  $tg\delta_{nam}$



Сл. 3.2.13 Функције припадности за улаз  $\max(dRCu)$



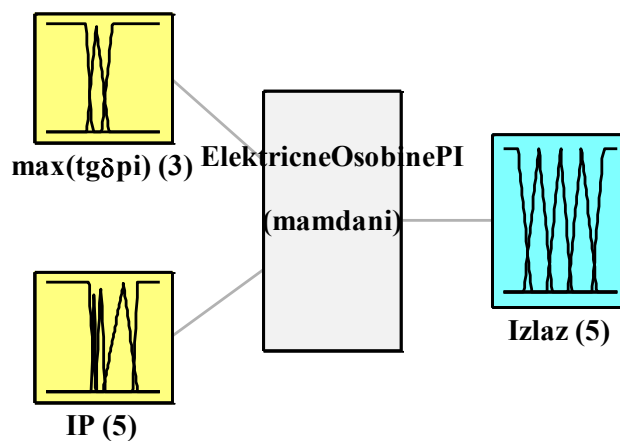


Сл. 3.2.14 Функције припадности за излаз фази експертских подсистема који се односе на електричне особине намотаја и проводних изолатора ЕТ-а

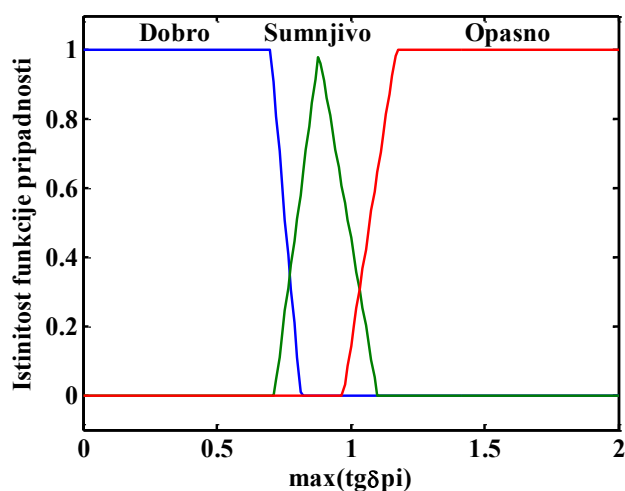
Фази експертски подсистем за електричне особине проводних изолатора ЕТ-а (Сл. 3.2.15) има за улазе:

- вредност индекса поларизације  $IP$  и
- максималну вредност  $tg\delta$  проводног изолатора  $max(tg\delta_{nu})$ .

Фазификација улаза  $IP$  је већ приказана на Сл. 3.2.11, а фазификациј  $max(tg\delta_{nu})$  је у складу са Таб. 2.2.4 приказаном на Сл. 3.2.16. База правила за овако формиран фази експертски подсистем је представљена у Таб. П. 0.2.



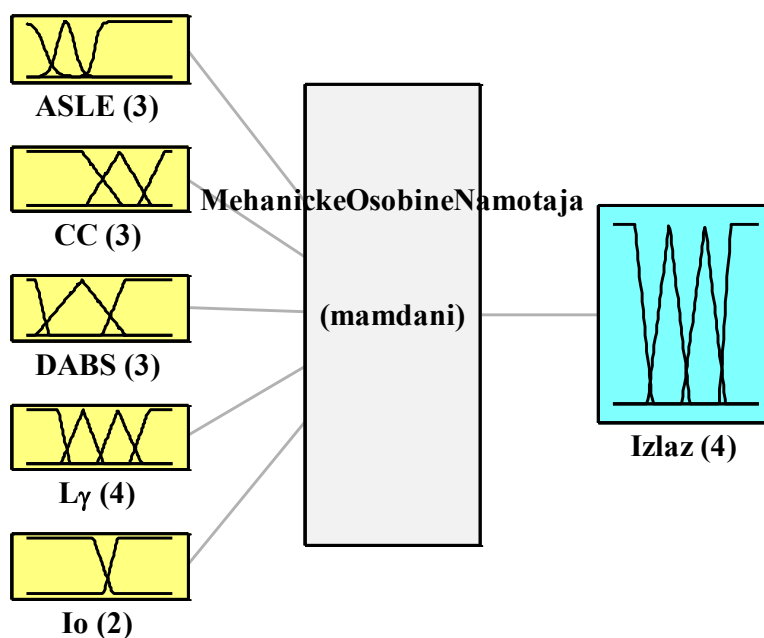
Сл. 3.2.15 Фази експертски подсистем за електричне особине проводних изолатора ЕТ-а са својим улазима



Сл. 3.2.16 Функције припадности за улаз  $\max(tg\delta_{nu})$

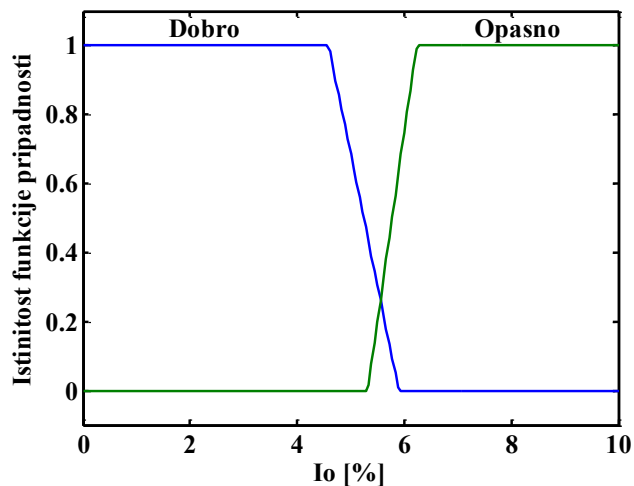
Фази експертски подсистем за механичке особине намотаја ЕТ-а (Сл. 3.2.17) има за улазе:

- струју празног хода ( $I_o$ ),
- импедансу кратког споја, тј. индуктивност услед расипања ( $L\gamma$ ) и
- резултате FRA методе, тј. параметре  $CC$ ,  $ASLE$  и  $DABS$ .

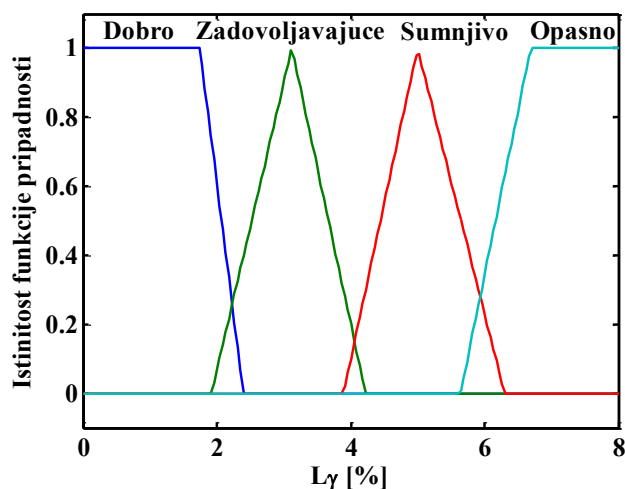


Сл. 3.2.17 Фази експертски подсистем за механичке особине намотаја ЕТ-а са својим улазима

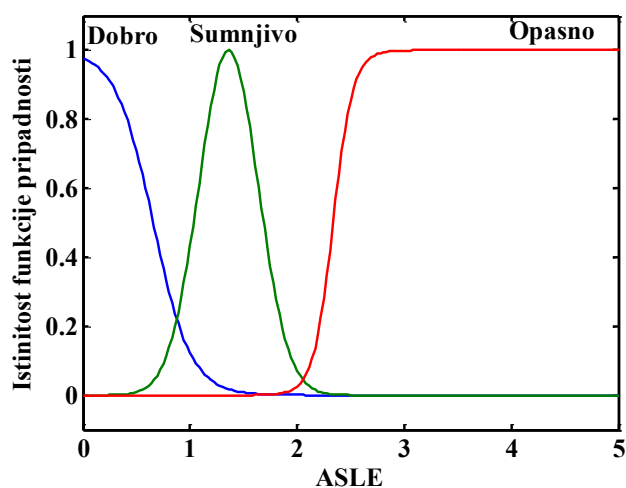
Овакав подсистем указује на механичке промене на намотајима и у магнетном колу ЕТ-а, услед чега долази до промене  $R$ ,  $L$  и  $C$  параметара намотаја. Фазификација улаза  $I_o$  је у складу са чињеницама да су дозвољена одступања до 5% и подразумева увођење две функције припадности (Сл. 3.2.18). Функције припадности за улаз  $L\gamma$  су приказане на Сл. 3.2.19 и ускладу су са опсезима одступања 2–4% и 4–6%. На сликама Сл. 3.2.20, Сл. 3.2.21 и Сл. 3.2.22 су приказане функције припадности за улазе  $ASLE$ ,  $DABS$  и  $CC$ , које су у вези са датим објашњењима у поглављу 2.2. Излаз фази експертског система за механичке особине намотаја је представљен са четири функције припадности као на Сл. 3.2.23. Листа правила за фази подсистем механичких особина намотаја представљена је у Таб. П. 0.3.



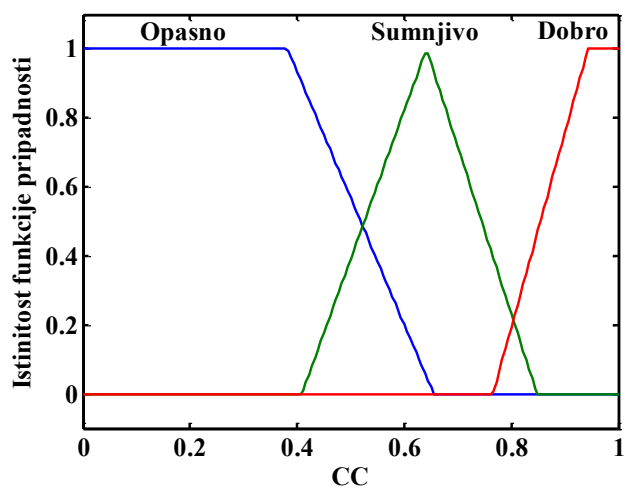
Сл. 3.2.18 Функције припадности за улаз  $I_o$



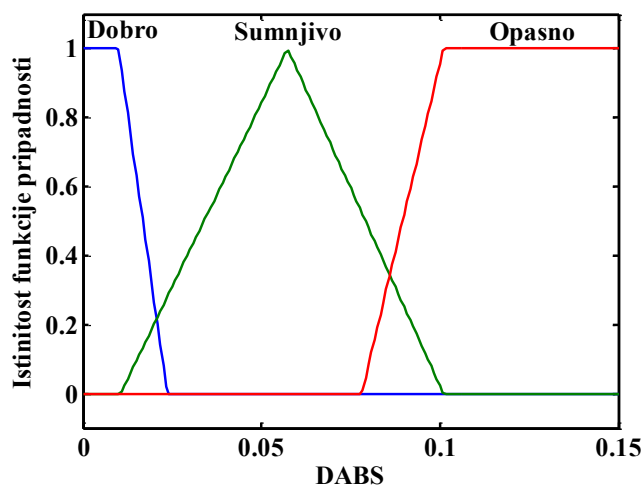
Сл. 3.2.19 Функције припадности за улаз  $L\gamma$



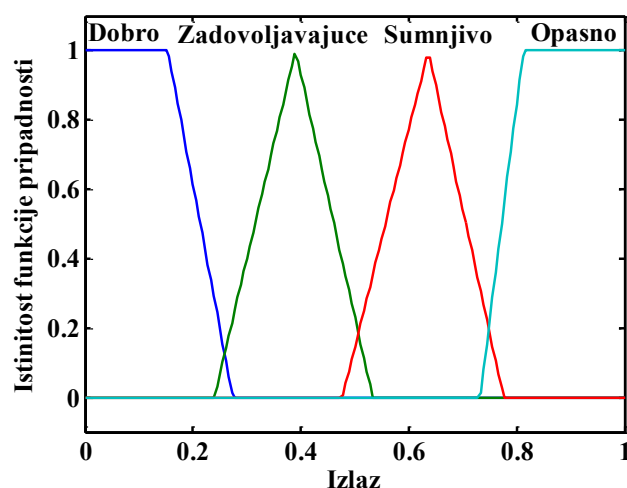
Сл. 3.2.20 Функције припадности за улаз *ASLE*



Сл. 3.2.21 Функције припадности за улаз *CC*



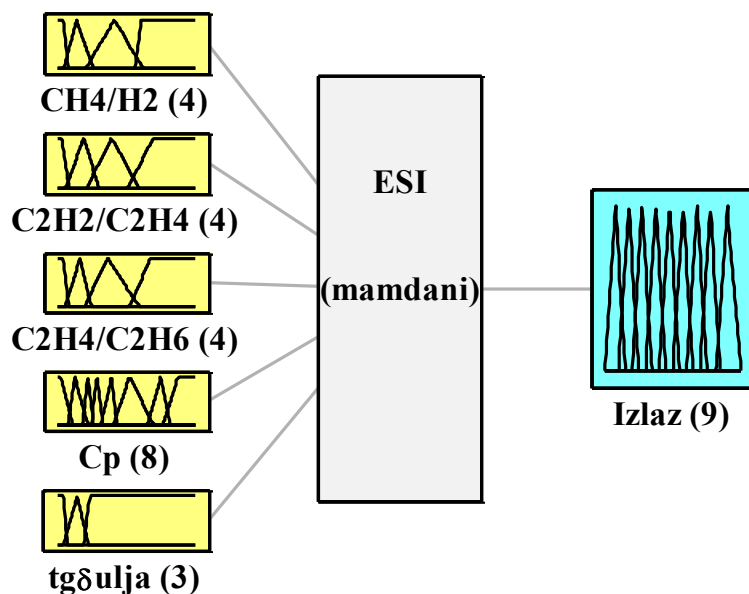
Сл. 3.2.22 Функције припадности за улаз *DABS*



Сл. 3.2.23 Функције припадности за излаз фази подсистема за механичке особине намотаја ЕТ-а

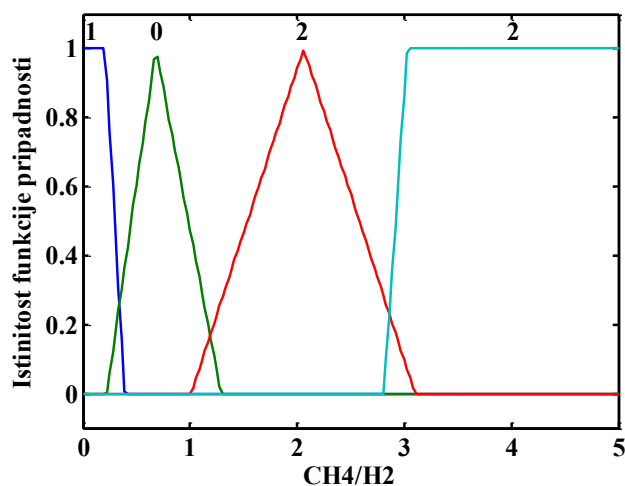
Фази експертски подсистем за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а (Сл. 3.2.17) има за улазе:

- струју празног хода ( $I_0$ ),
- $tg\delta$  уља  $tg\delta_{уља}$  и
- резултате DGA анализе, тј. параметре  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

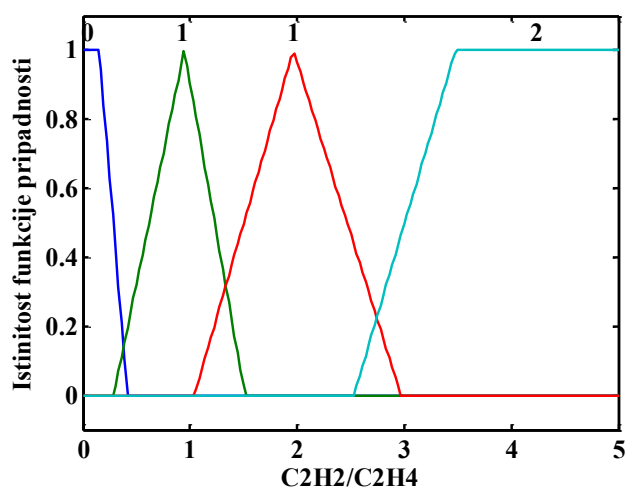


Сл. 3.2.24 Фази експертски подсистем за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а са својим улазима

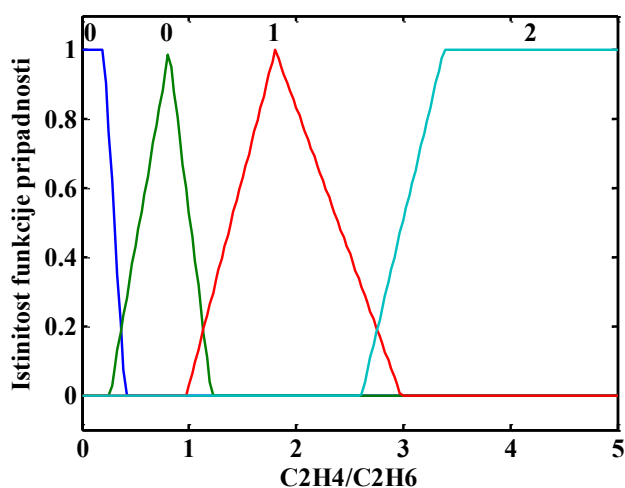
Сврха оваквог подсистема јесте да укаже на стање ЕСИ ЕТ-а. Фазификација улаза  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , који су односи гасова, јесте у складу са Таб. 2.2.8. Сваки од улаза има по четири функције припадности (Сл. 3.2.25, Сл. 3.2.26 и Сл. 3.2.27) које су означене са 0, 1 или 2, у складу са опсезима вредности односа гасова. Функције припадности за улаз  $Cp$  су приказане на Сл. 3.2.28 и у складу су са опсезима одступања из Таб. 2.2.8. На Сл. 3.2.29 су приказане три функције припадности за улаз  $tg\delta_{y\delta a}$  који је повезан са Таб. 2.2.5. Излаз фази експертског система за електричне и хемијске особине ЕСИ је представљен помоћу девет функција припадности као на Сл. 3.2.30 које су у вези са конкретним кваровима из Таб. 2.2.8. База правила за овакву фазификацију улаза подсистема за ЕСИ представљена је у Таб. П. 0.4.



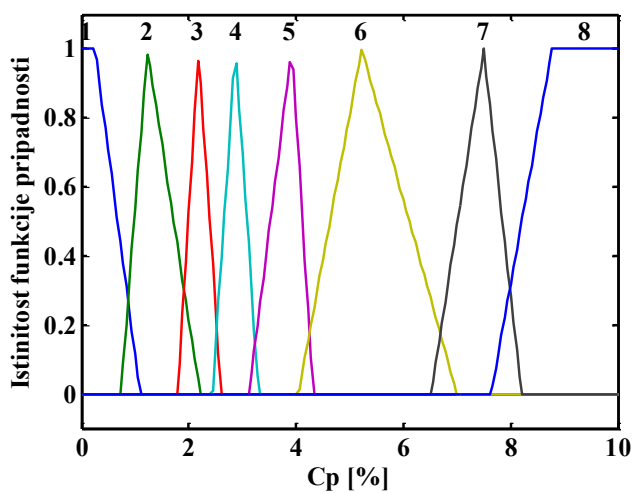
Сл. 3.2.25 Функције припадности за улаз  $X$



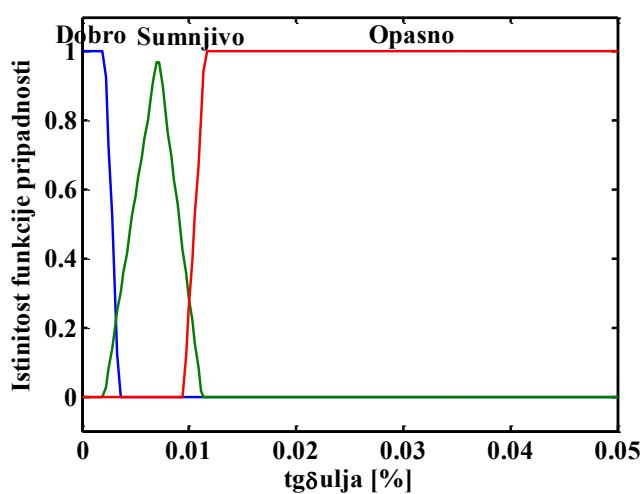
Сл. 3.2.26 Функције припадности за улаз  $Y$



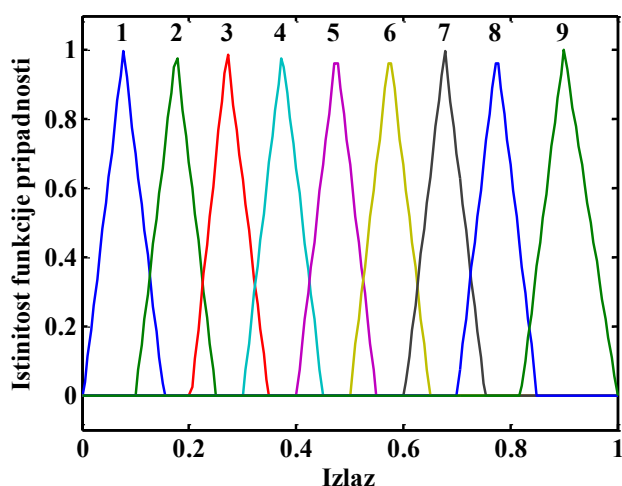
Сл. 3.2.27 Функције припадности за улаз  $Z$



Сл. 3.2.28 Функције припадности за улаз  $C_p$

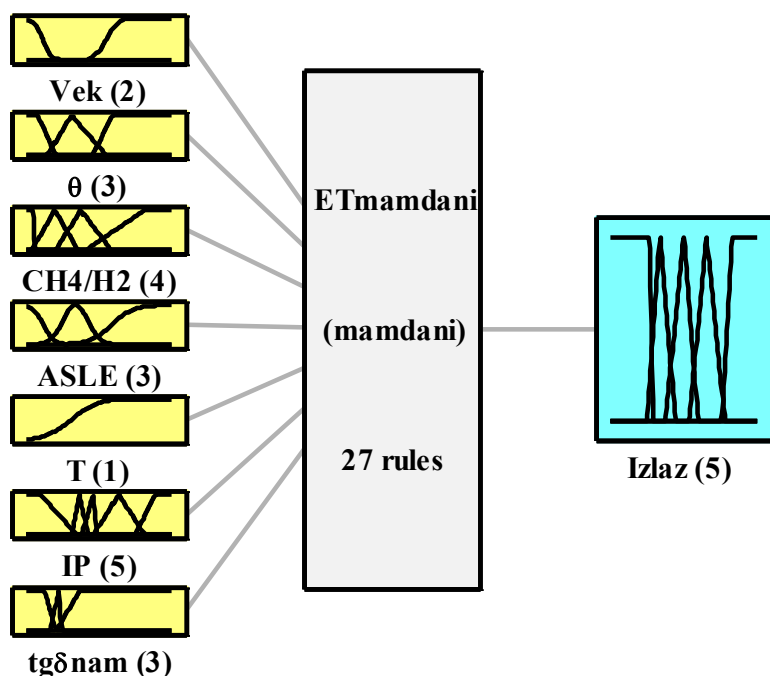


Сл. 3.2.29 Функције припадности за улаз  $tg\delta_{ulja}$



Сл. 3.2.30 Функције припадности за излаз фази подсистема за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а

ЕТ је најбитнији елемент разводног постројења који има највећу новчану вредност, па његово неправилно одржавање доводи до највећих губитака. Стога је за њега извршена анализа осетљивости рада експертског система. Формиран је експертски систем (Сл. 3.2.31) који као улазе има већину мерених параметара.



Сл. 3.2.31 Фази експертски систем за ЕТ са *Mamdani* типом закључивања



Због масовности улаза и сувише компликованог задавања правила у бази правила поједини параметри из мерних метода су изостављени. Анализа са комбиновањем појединих улаза је извршена код ЕТ-а зато што се на тај начин види и утицај недостатка појединих параметара, што је чест случај код дијагностике стања ЕТ-а. Из DGA анализе дозвољено је одабрати један од односа гасова ( $X$ ,  $Y$  или  $Z$ ). Такође из FRA анализе се бира један од показатеља ( $CC$ ,  $DABS$  или  $ASLE$ ). Такође, одабрани су само електрични показатељи намотаја ЕТ-а. Функције припадности за све улазе су исте као код фази подсистема. За тако задате улазе формиране су базе правила за *Mamdani* и *Sugeno* систем закључивања. Такође је формиран и *Sugeno* експертски систем нултог реда.

Сви формиран експертски системи за ЕТ су тестирани за исте улазне податке и на тај начин су поређени резултати. Функционисање употребљених типова закључивања је објашњено у Прилог 1 – Фази теорија, а њихове предности и мане са аспекта дијагностике су описане након тестирања. База правила за фази *Mamdani* експертски систем је представљена у Таб. П. 0.5, а правила *Sugeno* система су приказана у Таб. П. 0.7.

Оно што је карактеристично за *Sugeno* експертски систем нултог реда јесте да се излаз не приказује функцијама припадности, већ је константа. Пошто дефазификација код оваквог типа закључивања не постоји, онда он брже доноси закључке. Пошто су излази свих претходно формираних система у опсегу од 0 до 1, онда је то и овде случај. Уз сваку излазну константну дефинисани су могући кварови:

- 0,05 – нема ни механичких ни термичких кварова и стање изолације је нормално,
- 0,15 – парцијално пражњење енергије мале густине, пражњење у гасним шупљинама насталим услед непотпуне импрегнације или високе влажности,
- 0,25 – парцијално пражњење енергије велике густине, доводи до стварања проводних стаза или рупа у чврстој изолацији,
- 0,35 – пражњење мале енергије, континуално варничење у уљу између лоших спојева различитих потенцијала,

- 0,45 – пражњење велике густине енергије, лучни пробој уља између навојака или намотаја или намотаја и земље, проблеми са регулационом склопком,
- 0,55 – термички квар при нижим температурама до 150 °C, прегревање изолованих проводника и почетак механичких проблема,
- 0,65 – механички проблеми, механички помераји и оштећења намотаја и језгра,
- 0,75 – термички квар у опсегу температура од 150 °C до 300 °C, локално прегревање језгра због концентрације флукса,
- 0,85 – термички квар у опсегу средњих температура од 300 °C до 700 °C, повећање температуре топлих места и појава мањих топлих места у језгру и
- 0,95 – термички квар високе температуре преко 700 °C, прегревање бакра због лоших контаката или могућег кратког споја.

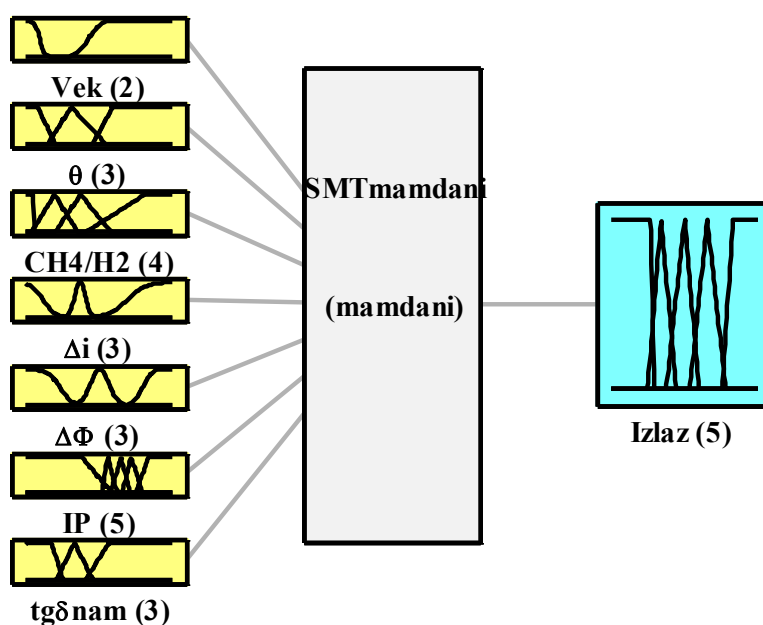
Константе су изабране тако да могуће кварове поделе у десет група, од најлакших до најтежих кварова. Тумачење ових константи може бити да прва група има 5%, а последња група има 95% вероватноће испада трансформатора из погона. Значење изабраних константи, на основу правила, јесте да би се указало на кварове који произилазе из улазних параметара. База правила за Sugeno експертски систем нултог реда је приказана у Таб. П. 0.6.

### 3.3. Фази експертски систем за мерни трансформатор

У поглављу 2.2 су представљени најчешће мерени параметри и њихове оријентационе граничне вредности које су најрелевантније за дијагностику стања МТ-а. МТ је битан елемент разводног постројења али се свакако мање испитује од ЕТ-а. Зато је и мањи број параметара чије граничне вредности могу бити уопштене. Најчешћи начин откривања кварова код МТ-а јесте путем термовизије, а најлакше откривање лошег мерења и губитка функције јесте кроз метролошки преглед провере тачности МТ-а. Због тога је одлучено да се формира један јединствени фази експертски систем (Сл. 3.3.1) МТ-а са *Mamdani* закључивањем који ће за улазе имати:

- животни век МТ-а ( $V$ ),

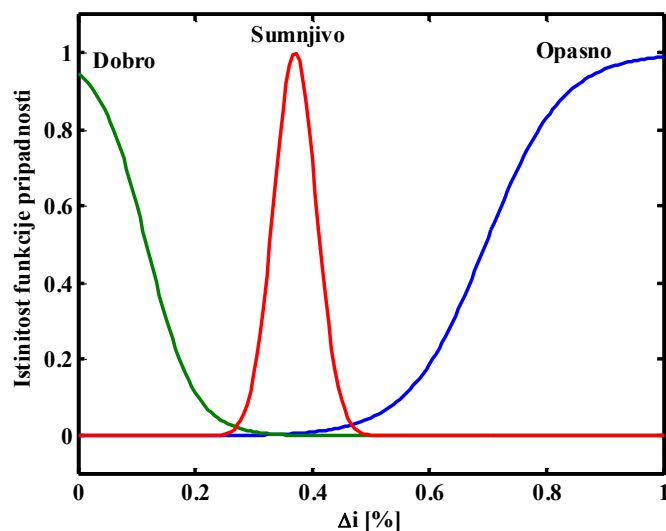
- вредност индекса поларизације  $IP$ ,
- вредност вредност  $tg\delta$  намотаја  $tg\delta_{нам}$  и
- струјне грешке  $\Delta i$ ,
- фазне грешке  $\Delta\varphi$ ,
- температуру прегревања актуелне термографије ( $\theta$ ) и
- један однос гасова  $DGA$  анализе (X или Y или Z).



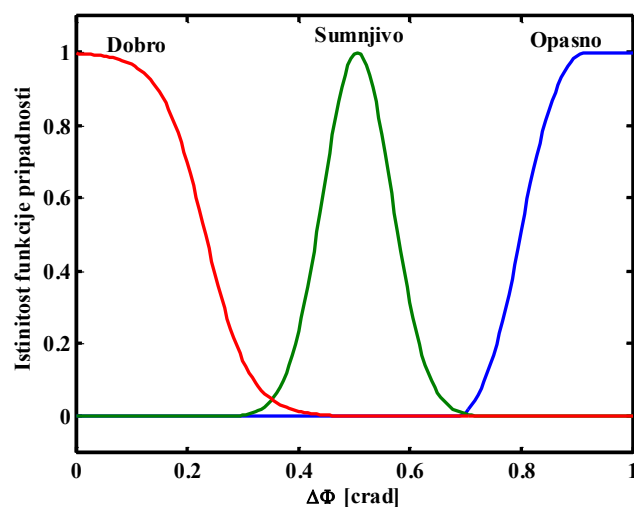
Сл. 3.3.1 Фази експертски систем за СМТ

На претходној слици је представљен фази модел СМТ-а који ће бити коришћен у прорачуну поузданости разводног постројења. Фази модел стања НМТ може бити на исти начин формиран, с тим што би се функције припадности за метролошке параметре разликовале. Фазификација улаза  $IP$  је у складу са Таб. 2.3.2 и слична је као за ЕТ (Сл. 3.2.11), само су кориговане вредности на апциси у складу са граничним вредностима опсега. Облик функција припадности за улаз  $tg\delta_{нам}$  је исти као за ЕТ (Сл. 3.2.12), само су вредности у складу са Таб. 2.3.3. Фазификација улаза температуре топлог места и животног века је иста као и за ЕТ, само су функције припадности за век транслиране тако да СМТ раније достиже већу вероватноћу квара. За улаз  $DGA$  анализе изабран је однос гасова  $CH_4/H_2$ , чија је фазификација приказана на Сл. 3.2.25. Граничне вредности за

струјну и фазну грешку су изабране за СМТ класе тачности 0,2. Фазификација ова два улаза је у складу са Таб. 2.3.5 и приказана је на Сл. 3.3.2 и Сл. 3.3.3.



Сл. 3.3.2 Функције припадности за улаз  $\Delta i$  експертског система СМТ-а



Сл. 3.3.3 Функције припадности за улаз  $\Delta \varphi$  експертског система СМТ-а

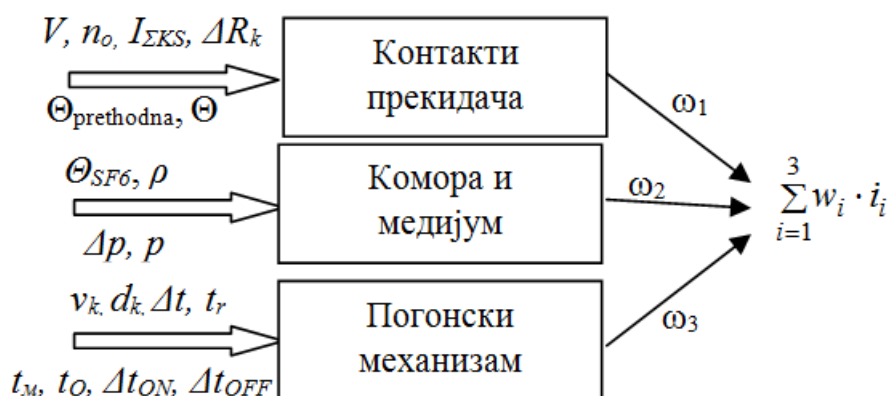
За СМТ друге класе тачности или друге намене потребно је модификовати апцисе функција припадности струјне и фазне грешке. Излаз овако формираног фази експертског система већ је представљен помоћу пет функција припадности као на Сл. 3.2.14. База правила по узору на *Mamdani* експертски систем ЕТ-а [60] има 27 правила и представљена је у Таб. П. 0.8.

### 3.4. Фази експертски систем за прекидач

Улога прекидача у разводном постројењу и његов утицај на безбедан и сигуран рад остале опреме разводног постројења је објашњен у поглављу 2.4. Пажња која се обраћа на мониторинг, дијагностику и одржавање прекидача се може сагледати и кроз број референци који се баве овом тематиком. Склопови, делови прекидача који се испитују су: изолација, комора и медијум за гашење електричног лука и погонски механизам прекидача. Међутим, веома је мали број кварова на изолацији прекидача, а преко 50% кварова се јавља на контактима прекидача. Стога је у дисертацији формиран фази експертски подсистем који се односи на стање контаката прекидача. Фази експертски систем SF<sub>6</sub> прекидача је слично као код ЕТ-а састављен од трију фази експертских подсистема за:

- контакте прекидача,
- комору и медијум за гашење електричног лука и
- погонски механизам прекидача.

Оваква три подсистема (Сл. 3.4.1) указују на вероватноће кварова појединих делова прекидача и указују на најслабију тачку прекидача. Сва три подсистема су са *Mamdani* типом закључивања.

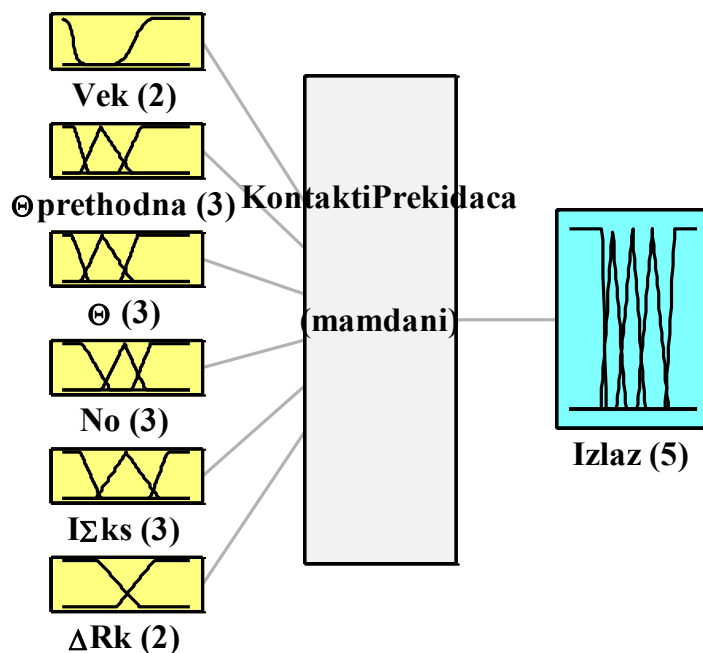


Сл. 3.4.1 Експертски систем прекидача са трима фази експертским подсистемима

Фази експертски подсистем за дијагностику контаката прекидача се базира на термографији. Разлог је што се термографским прегледом најлакше уочавају топла места која настају услед оштећења контаката прекидача. У складу са тим улази оваквог подсистема (Сл. 3.4.2) су:

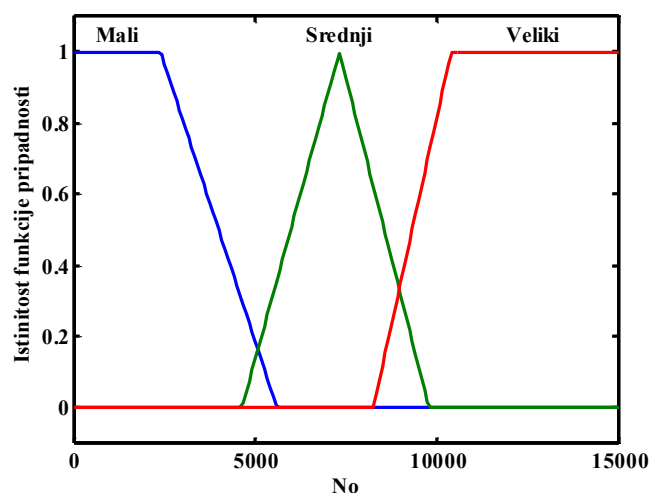
- животни век ( $V$ ),

- температура прегревања при претходној термографији ( $\theta_{\text{претходна}}$ ),
- температура прегревања актуелне термографије ( $\theta$ ),
- максимални број операција ( $n_o$ ),
- сума квадрата струја искључења свих кратких спојева ( $I_{\Sigma KS}$ ) и
- одступање контактне отпорности по фазама ( $\Delta R_k$ ).

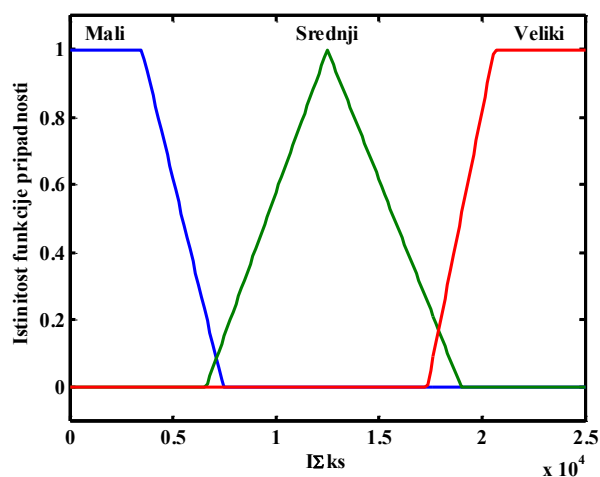


Сл. 3.4.2 Фази експертски подсистем за дијагностику контаката прекидача

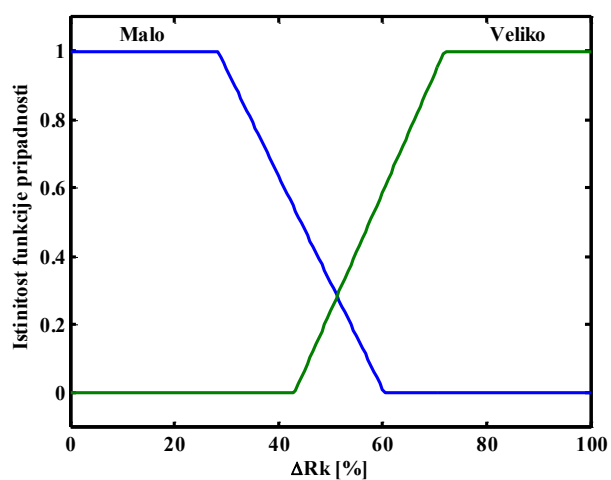
Фазификација прва три улаза је идентична као код фази експертског подсистема за термографију ЕТ-а (Сл. 3.2.5, Сл. 3.2.6 и Сл. 3.2.3). Једина разлика је у томе што је животни век прекидача краћи од ЕТ-а. Улази  $n_o$  (Сл. 3.4.3) и  $I_{\Sigma KS}$  (Сл. 3.4.4) су представљени трима функцијама припадности које означавају мали, средњи и велики број склопних операција, односно вредности струја кратких спојева које су прекинуте.



Сл. 3.4.3 Функције припадности за максимални број операција



Сл. 3.4.4 Функције припадности за суму квадрата струја искључења свих кратких спојева



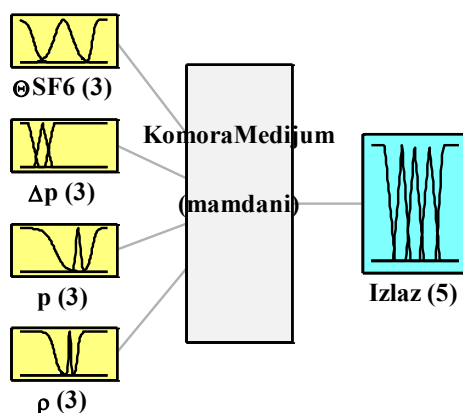
Сл. 3.4.5 Функције припадности за одступање контактне отпорности по фазама

Фазификација улаза  $\Delta R_k$  (Сл. 3.4.5) је извршена помоћу двеју функција припадности које се односе на одступање веће и мање од 50%. Све вредности које су узете у обзир се односе на Таб. 2.4.1. Функције припадности за излаз фази екпертског подсистема за контакте прекидача су представљене на Сл. 3.2.7, а база правила се може ишчитати из Таб. П. 0.9.

Фази екпертски подсистем за дијагностику коморе и медијума за гашење електричног лука има за улазе:

- температуру гаса ( $\Theta_{SF6}$ ),
- дозвољено цурење гаса ( $\Delta p$ ),
- притисак гаса ( $p$ ) и
- густину гаса ( $\rho$ ).

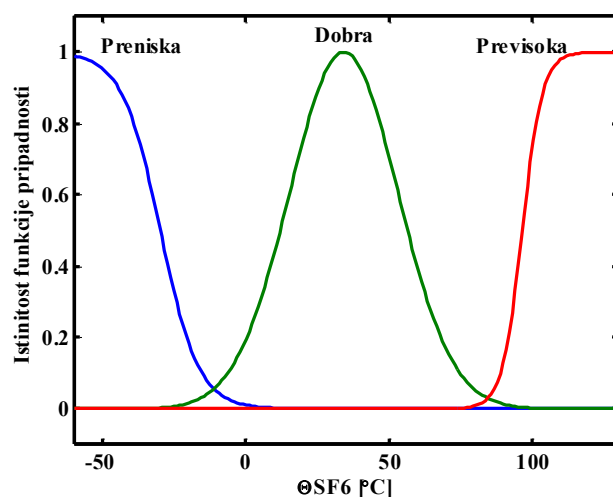
Функције припадности за улазе  $\Theta_{SF6}$  (Сл. 3.4.7),  $p$  (Сл. 3.4.9) и  $\rho$  (Сл. 3.4.10) су у складу са мерењима у радовима [4],[43] представљене са сигмуноидним и гаусовим кривама. Те криве се односе на учестаност понављања код мерења ових параметара.



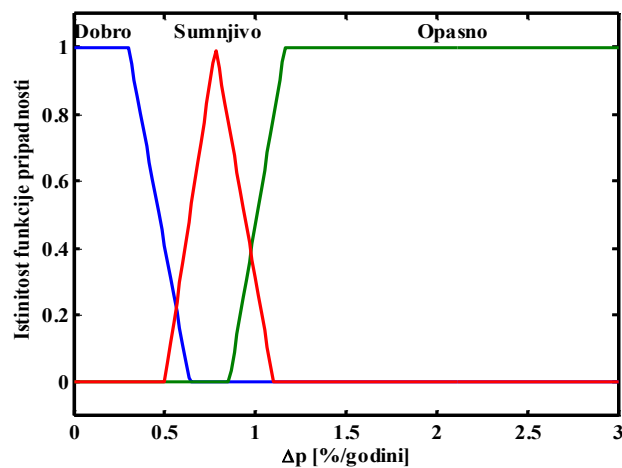
Сл. 3.4.6 Фази екпертски подсистем за дијагностику коморе и медијума за гашење електричног лука код прекидача

Функције припадности су карактеристичне јер је једино један опсег вредности – једна функција припадности улаза – задовољавајући са стране дијагностике. Фазификација улаза  $\Delta p$  је представљена на Сл. 3.4.8, а фазификација излаза на Сл. 3.4.11. Граничне вредности параметара у њиховим функцијама припадности су у складу са Таб. 2.4.1. База правила овако формираног фази екпертског подсистема се може видети у Таб. П. 0.10.

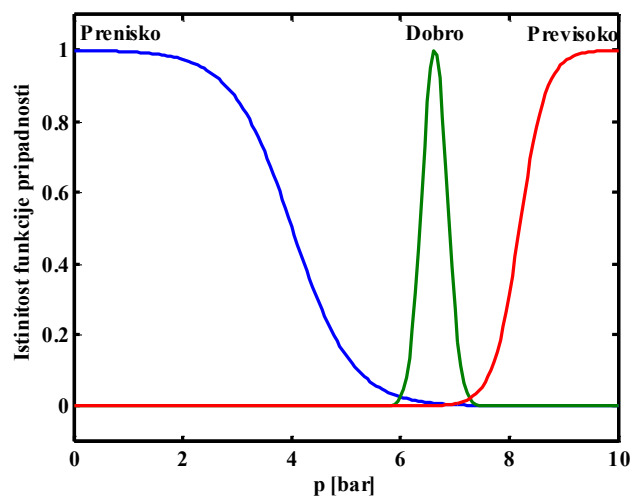




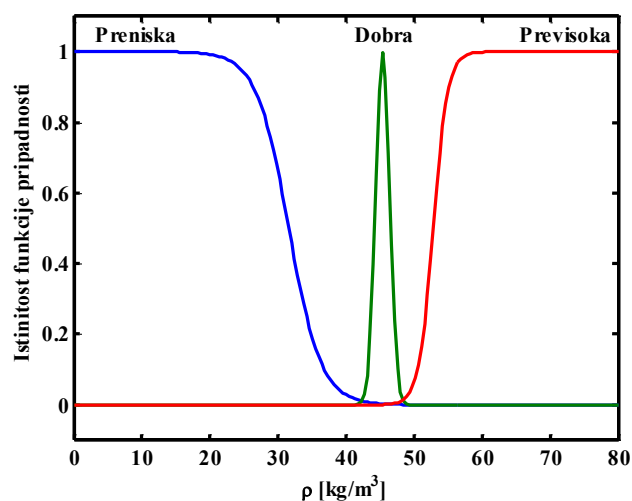
Сл. 3.4.7 Функције припадности за температуру гаса



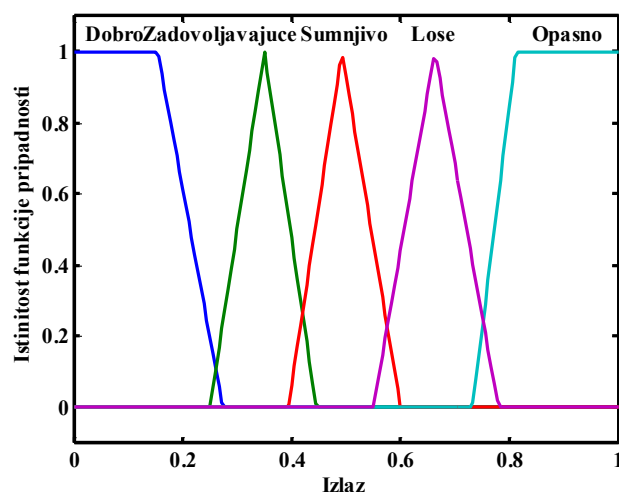
Сл. 3.4.8 Функције припадности за дозвољено цурење гаса



Сл. 3.4.9 Функције припадности за притисак гаса



Сл. 3.4.10 Функције припадности за густину гаса



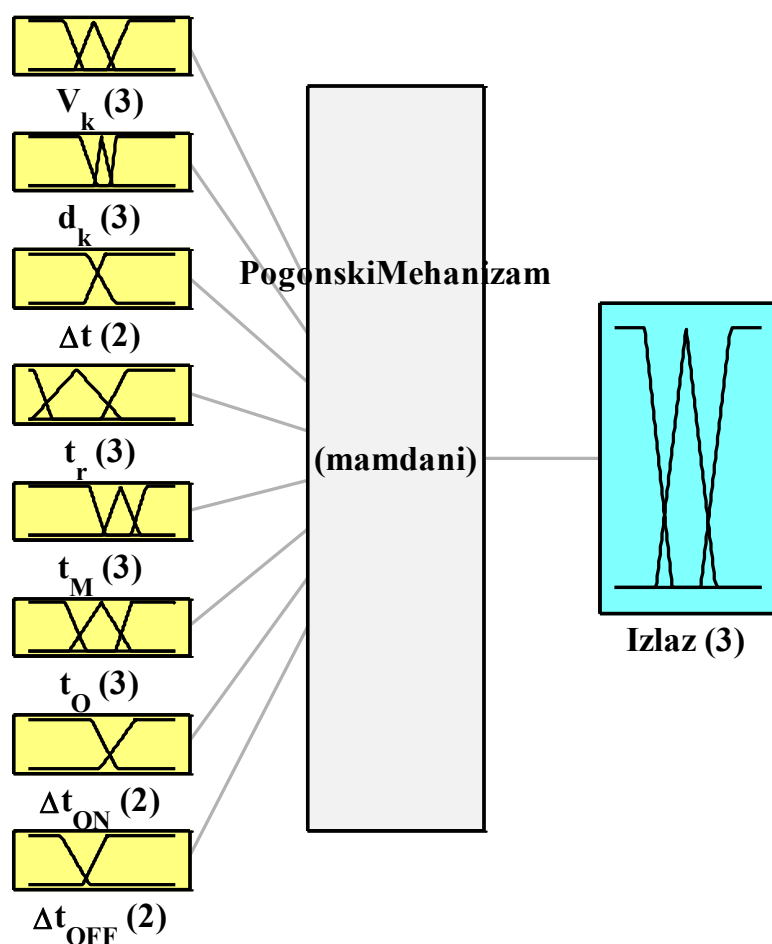
Сл. 3.4.11 Функције припадности излаза фази експертског подсистема за дијагностику коморе и медијума за гашење електричног лука код прекидача

Улази фази експертског подсистема (Сл. 3.4.12) за дијагностику калема и погонског механизма прекидача су:

- брзина контаката ( $v_k$ ),
- дужина пута контаката ( $d_k$  [mm]),
- дозвољено време расипања ( $\Delta t$  [ms]) између полова прекидача,
- време реаговања ( $t_r$  [ms]),
- време механизма ( $t_m$  [ms]),
- време натезања опруге ( $t_o$  [ms]),
- одступање времена операције укључења ( $\Delta t_{ON}$  [ms]) и

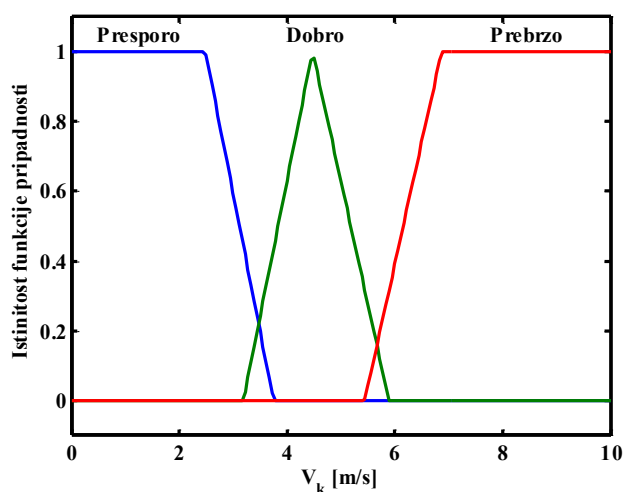
- одступање времена операције искључења ( $\Delta t_{OFF}$  [ms]).

Оно што је карактеристично за фазификацију улаза овог подсистема јесте што су дефинисане граничне вредности, тј. само један опсег вредности је добар. Дакле, времена механизма и опруге не треба да буду ни прекратка ни предугачка, јер ће у супротном доћи до оштећења прекидача. То исто важи и за брзину (Сл. 3.4.13) и удаљеност (Сл. 3.4.14) контаката, па су они фазификовани трима функцијама припадности, двама трапезоидним (преспоро – прекратко и пребрзо – предугачко) и једном троугаоном (добро).

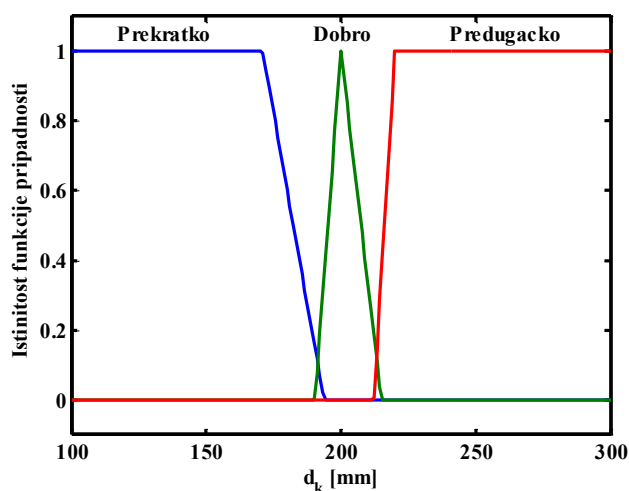


Сл. 3.4.12 Фази експертски подсистем за дијагностику погонског механизма прекидача

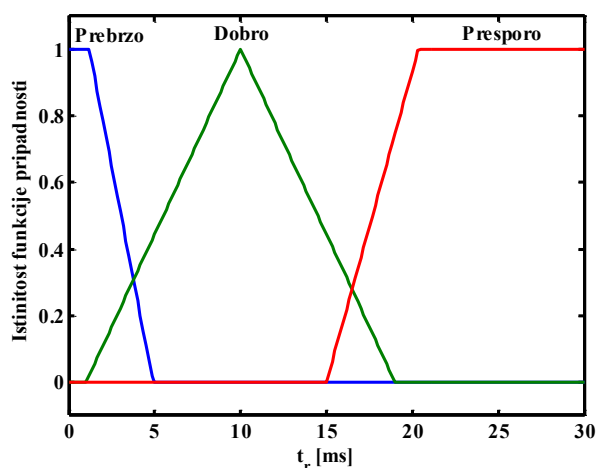
Фазификација улаза времена  $t_r$ ,  $t_m$  и  $t_o$  је идентична и представљена је на Сл. 3.4.15, с тим што се вредности на апсиси разликују у складу са Таб. 2.4.1. Две функције припадности за улазе  $\Delta t$ ,  $\Delta t_{ON}$  и  $\Delta t_{OFF}$  су представљене на Сл. 3.4.16 и означавају добро (мање одступање од дозвољеног) и опасно (одступање веће од дозвољеног) одступање величине. За улазе се једино разликују вредности на апсиси функција припадности према Таб. 2.4.1. Фазификација излаза је представљена трима функцијама припадности (Сл. 3.4.17), како би се правила логично уклапала са функцијама припадности улаза. База правила је представљена у Таб. П. 0.11.



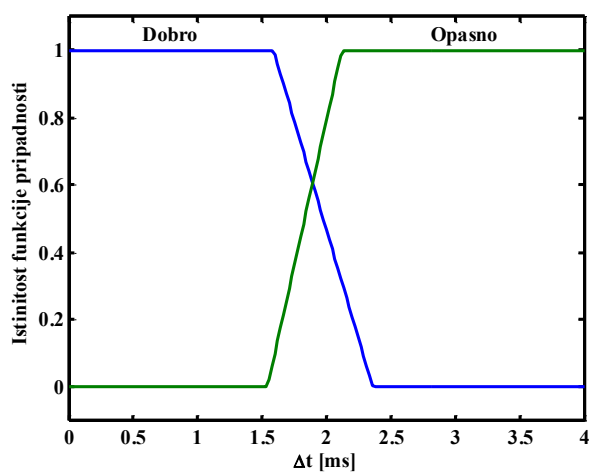
Сл. 3.4.13 Функције припадности за брзину контаката прекидача



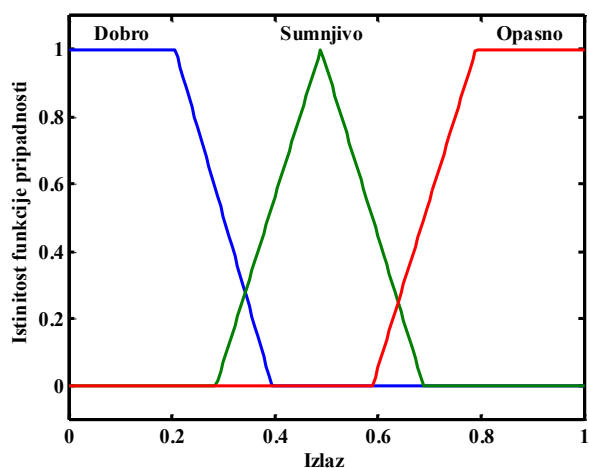
Сл. 3.4.14 Функције припадности за удаљеност контаката прекидача



Сл. 3.4.15 Функције припадности за време реаговања контаката прекидача



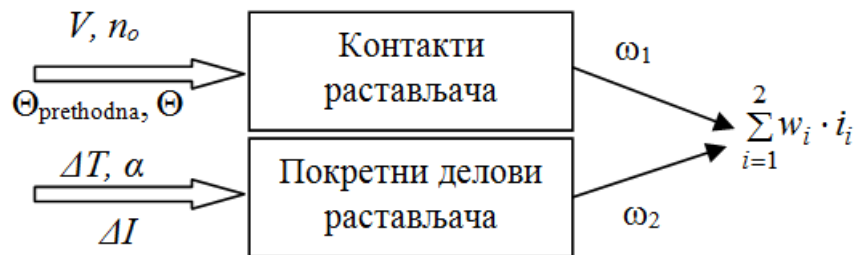
Сл. 3.4.16 Функције припадности за дозвољено време расипања између полова прекидача



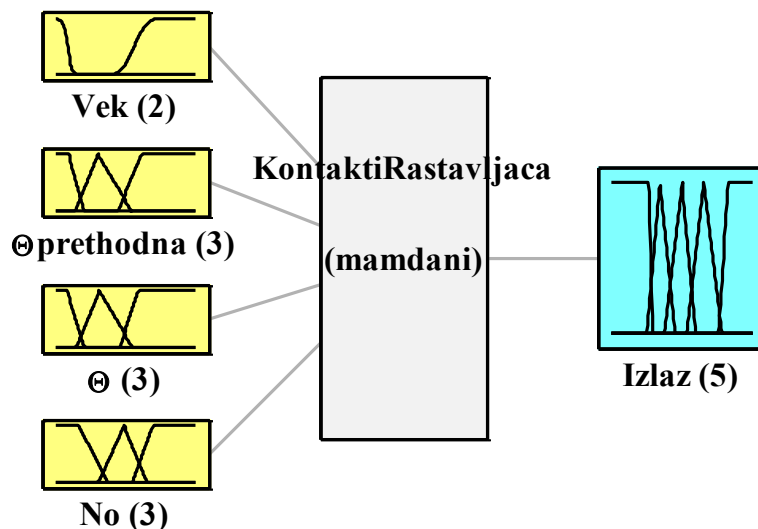
Сл. 3.4.17 Фазификација излаза фази експертског подсистема за погонски механизам прекидача

### 3.5. Фази експертски систем за растављач

Број растављача у ЕЕС-у је дупло већи од броја прекидача, због тога се уједно и највећи број кварова и јавља на њима (Таб. 2.5.1). Кварови су углавном типски и деле се на: запрљање и прегревање контакта, унутрашњи кварови изолатора и сметње код покретних делова. Прве две групе кварова се углавном уочавају термографијом, а механички кварови код покретног механизма се детектују уочавањем одступања времена реаговања и струје мотора растављача. На основу тога фази модел стања растављача (Сл. 3.5.1) се састоји од два фази експертска Mamdani подсистема: контакти и покретни делови растављача. Експертски подсистем за контакте (Сл. 3.5.2) се базира на термографији и има за улазе:



Сл. 3.5.1 Експертски систем растављача са два фази експертска подсистема



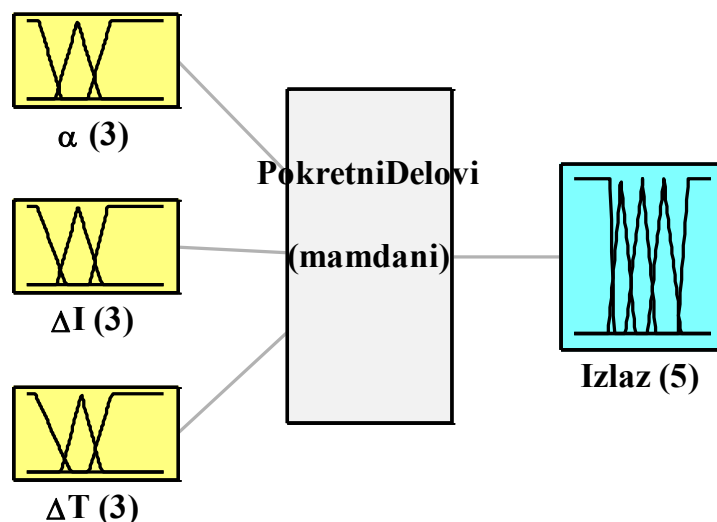
Сл. 3.5.2 Фази експертски подсистем за дијагностику контаката прекидача

- животни век ( $V$ ),
- температуру прегревања при претходној термографији ( $\theta_{\text{претходна}}$ ),
- температуру прегревања актуелне термографије ( $\theta$ ) и
- максимални број операција ( $n_o$ ).

Фазификација прва три улаза је идентична као код фази експертског подсистема за термографију ЕТ-а и прекидача (Сл. 3.2.5, Сл. 3.2.6 и Сл. 3.2.3). Разлика која се јавља је на апсиси животног века је као и код прекидача. Улаз  $n_o$  је идентичан као код дијагностике прекидача (Сл. 3.4.3). Функције припадности за излаз фази експертског подсистема за контакте растављача су представљене на Сл. 3.2.7, а база правила се може ишчитати из Таб. П. 0.12.

Улази фази експертског подсистема за покретне делове прекидача (Сл. 3.5.3) су:

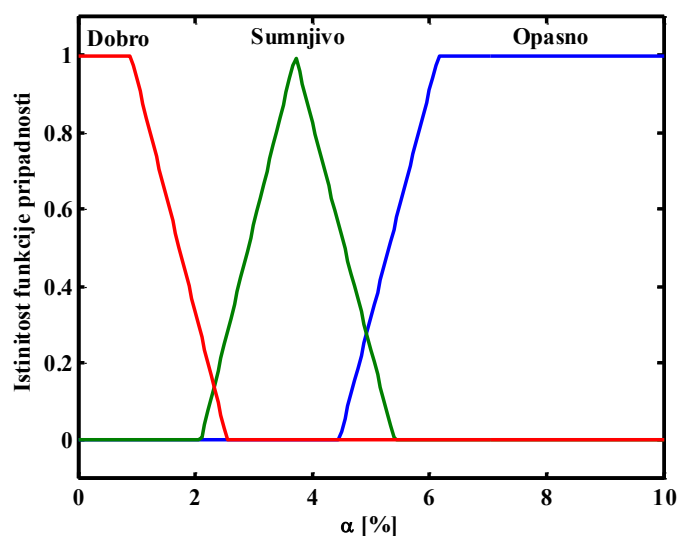
- разлика времена операције  $\Delta T$  новог и растављача у експлоатацији,
- разлика угла ротације  $\alpha$  и
- пораст струје мотора растављача  $\Delta I$ .



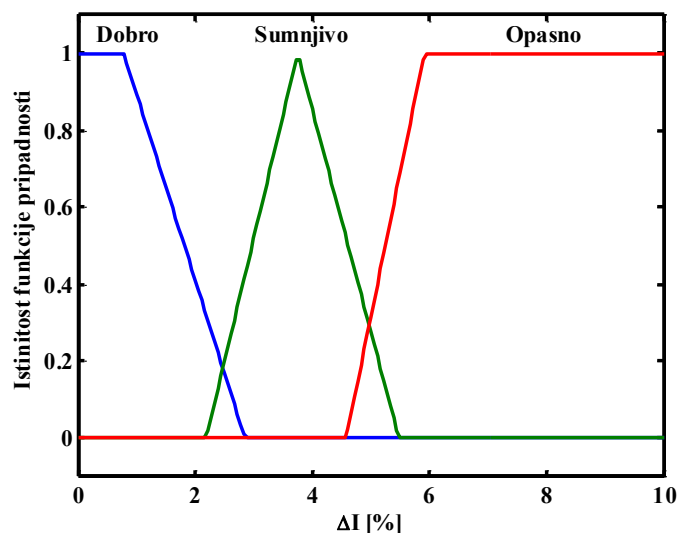
Сл. 3.5.3 Фази експертски подсистем за дијагностику покретних делова растављача

Сва три улаза имају једну граничну вредност. Ако је њихова вредност мања, тј. ако је одступање мање од вредности новог растављача, стање покретних делова

растављача је боље. Зато је фазификација као и до сада представљена двема трапезоидним (мало одступање – „добро“ и велико одступање – „опасно“) и једном троугаоном функцијом (умерено одступање – „сумњиво“). Функције припадности за улазе су представљени на Сл. 3.5.4, Сл. 3.5.5 и Сл. 3.5.6 и у складу су са објашњењима датим у поглављу 2.5. Излаз има исти облик као и код првог подсистема за контакте (Сл. 3.2.7). Формирана база правила је представљена у Таб. П. 0.13.

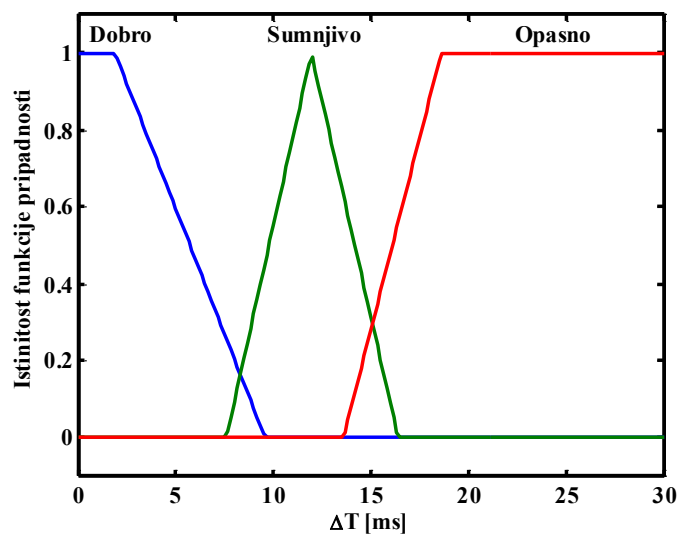


Сл. 3.5.4 Функције припадности за разлику угла ротације покретних делова растављача



Сл. 3.5.5 Функције припадности за пораст струје мотора растављача





Сл. 3.5.6 Функције припадности за разлику времена операције новог растављача и растављача у експлоатацији

## 4. МЕТОДА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ И ОДРЖАВАЊЕ РАЗВОДНОГ ПОСТРОЈЕЊА НА БАЗИ ФАЗИ ТЕОРИЈЕ

### 4.1. Уводна разматрања

Ово поглавље докторске дисертације се односи на наставак алгоритма методе за дијагностику стања разводног постројења на основу тренутног стања високонапонске опреме у њему и његове поузданости (Сл. 3.1.1). На основу мониторинга и дијагностике стања најбитније опреме у разводном постројењу потребно је проценити и стање дела или целог разводног постројења. Такви прорачуни пружају могућност за доношење правовремене одлуке о приоритету ремонта, замене или ревитализације делова постројења или опреме у њему. У складу са тим, за дисертацију су најбитније стратегије које се односе на тренутно стање и поузданост разводног постројења (*reliability centered asset management – RCAM*) [6], [7], [8]. Приоритети код доношења одлуке се постављају на основу стања високонапонске опреме и њеном значају у разводном постројењу. Проблематика старења високонапонске опреме и њеног утицаја на поузданост електроенергетског система је обрађена у склопу радне групе 37.27 CIGRE [34]. Радна група је на основу прикупљене базе податка из више ЕЕС-а и њихове статистичке обраде проценила утицај старости опреме на рад ЕЕС-а, могуће стратегије замене опреме и план развоја ЕЕС-а. Модел оцене стања високонапонске опреме и одређивање приоритета за активности замене, обнове или одржавања описан је у [61]. Такав модел се темељи на одређивању фактора ризика за различите категорије које описују стање опреме: старост, фреквенција кварова, регулативе за заштиту околине, трошкови одржавања, трошкови замене, расположивост резервних делова, способност особља, расположивост и трошкови поправке, сигурност за запослене, сигурност суседне опреме, утицај на потрошаче и други. Фактори ризика сваке категорије се множе са субјективно одређеним тежинским факторима и израчунава се укупан фактор ризика, на основу ког се доноси одлука. Овај модел је сличан методама које формирају индекс здравља код ЕТ-а [48], [28] и [29]. У оваквим моделима је сувише заступљен субјективни утицај, који може довести до погрешних одлука. Алгоритам одлучивања о

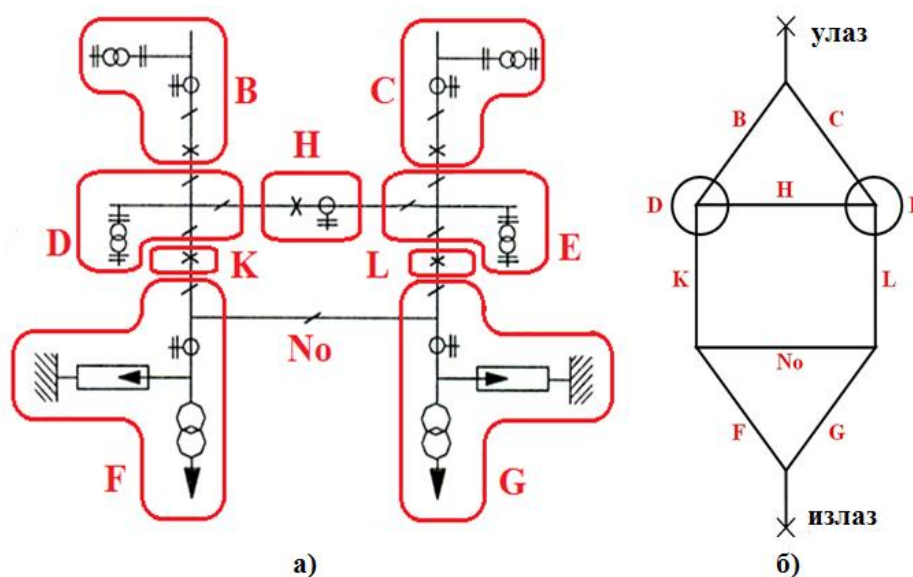
оптималном времену замене високонапонске опреме у ЕЕС-у Русије темељи се на трошковима рада, поправке, замене и преостале вредности опреме [62]. Унутар радне групе у оквиру IEEE/PES организације извршен је приказ класификације стратегија одржавања [63]. У том приказу се истиче предност пробалистичких у односу на детерминистичке моделе који утврђују везу између одржавања опреме и поузданости ЕЕС-а. Главна предност се огледа у могућности максимизације поузданости и минимизације трошкова ЕЕС-а. Да би ове предности биле искоришћене, у дисертацији је представљена пробалистичка модификација *RCAM* стратегије, која користи мапе ризика и индекс перформансе ситема [47]. Једна координата мапе ризика је стање високонапонске опреме, које је одређено на основу фази експертских система. Друга координата представља значај разматране високонапонске опреме у разводном постројењу. Значај је имплициран кроз цену неиспоручене електричне енергије и смањење поузданости разводног постројења услед квара разматраног дела високонапонске опреме или дела постројења. Ради одређивања цене неиспоручене електричне енергије и стања постројења у овом поглављу доктората је приказана метода минималних пресека која је модификована за рад са фази бројевима. Услед варијације појединих параметара у прорачуну (цене електричне енергије, оптерећења, време поправке и друго) примењена је фази теорија ради увођења неодређености у прорачун. Метода минималних пресека и примена мапе ризика је објашњена на примеру *N* шеме разводног постројења.

#### **4.2. Метода минималних пресека**

Поузданост електроенергетских постројења првенствено зависи од поузданости компоненти које се у њима налазе и њиховог распореда. У литератури [64], [63], [65] и [66] су развијене две групе метода за прорачун поузданости: метода минималних пресека и метода селективног претраживања. Метода селективног претраживања подразумева ручни преглед шеме постројења којим се утврђују догађаји који у потпуности или делимично нарушавају предвиђену функцију постројења. Овакву методу није могуће аутоматизовати јер захтева листу свих могућих догађаја везаних за разматрано специфично постројење. Стога се у дисертацији обрађује метода минималних пресека која се

може спровести мануелно али и компјутерски. Метод је систематичан и на једноставан начин идентификује слабе тачке у постројењу фокусирајући пажњу на компоненте које највише доприносе непоузданости система. Метод пре свега служи за анализу система описаних функционалним графовима.

У дисертацији се разматра еквивалента Н заменска шема разводног постројења и њој одговарајући граф (Сл. 4.2.1). Да би од заменске шеме формирао граф, потребно је прво уочити функционалне блокове. Функционални блок је група компоненти постројења које су тако функционално повезане да ремонт или квар било које од наведених компоненти прекида рад других компоненти групе.



Сл. 4.2.1 Еквивалентна Н заменска шема разводног постројења и б) Еквивалентни граф

Функционални блокови се састоје од високонапонске опреме чије се стање дијагностикује методом описаном у трећем поглављу дисертације. Заменска Н шема је издељена у блокове високонапонске опреме који представљају гране графа и имају ознаке: В, С, D, E, F, G, H, K, L и No. Пресек графа је дефинисан као скуп грана графа чијим се изостављањем прекида веза између улазног и излазног чвора. Минималан је онај пресек који у себи не садржи друге пресеке. Према дефиницији минималних пресека, веза између улазног и излазног чвора функционалног графа прекида се када су у прекиду једновремено све гране садржане у пресеку. Поменута веза губи се када је у прекиду бар један минимални пресек. Минимални пресеци графа су добијени једноставним претраживањем на основу графа са минималним путевима. Пут је низ на ред везаних грана графа које

спајају улазни и излазни чвор, а минималан је онај пут који ниједан чвор не прелази више од једном. Минимални путеви су: CLG, BKF, BHLG, BKGN<sub>o</sub>, CHKF, CLFN<sub>o</sub>, CHKGN<sub>o</sub>, BHLFN<sub>o</sub>. Минимални пресеци се одређују на основу позиције несигурних чворова. Кваром несигурног чвора искључују се све гране које су везане за ове чворове. Несигурни чвор са својим показатељима поузданости се мора укључити у све минималне путеве који садрже неку од грана која је повезана са овим чвором. Сваки функционални блок који је везан за несигурни чвор испада из погона када испадне поменути чвор. У Таб. 4.2.1 су дати несигурни чворови посматраног разводног постројења и припадајући функционални блокови.

Таб. 4.2.1 Несигурни чворови посматраног разводног постројења

Несигурни чвор (функционални блок)	Припадајући функционални блок
D	B, H, K
E	C, H, L

Узимајући у обзир минималне путеве и несигурне чворове, дефинисано је дванаест минималних пресека: BC, CD, BE, KL, DL, EK, FG, DE, LFN<sub>o</sub>, KGN<sub>o</sub>, DGN<sub>o</sub>, EFN<sub>o</sub>. Минимални пресеци су формиран ради одређивања стања целокупног разводног постројења. У том смислу потребно је прво одредити стање функционалних блокова на основу стања опреме у њима. Излаз фази експертских система јесу индекси стања опреме који се одређују на основу резултата испитивања опреме методом описаном у трећем поглављу. Такав излаз,  $i$ , јесте број из опсега 0 до 1 и може се тумачити као:

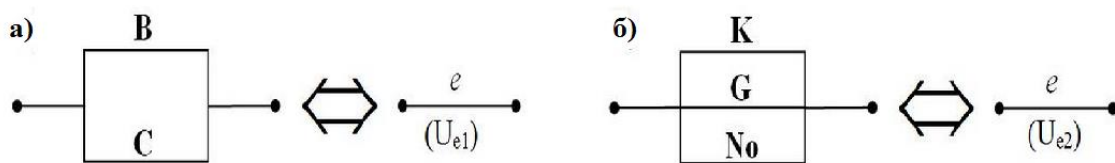
- индекс хитности интервенције или
- вероватноћа квара на посматраној опреми.

Ако је  $i$  веће испитивана опрема је угроженија и постоји већа могућност да на њој дође до квара. Индекс стања ( $I$ ) функционалних блокова је израчунат на основу индекса стања прекидача ( $i_{PRE}$ ), растављача ( $i_{RAS}$ ), енергетског трансформатора ( $i_{ET}$ ) и струјног мерног трансформатора ( $i_{SMT}$ ):

$$\begin{aligned}
 I_B = I_C &= i_{ET} + i_{SMT} + i_{RAS} + i_{PRE} \\
 I_D = I_E &= i_{ET} + 3 \cdot i_{RAS} \\
 I_K = I_L = I_H &= i_{PRE}, I_{No} = i_{RAS} \\
 I_F = I_G &= i_{ET} + i_{SMT} + i_{RAS}
 \end{aligned}
 \tag{4.2.1}$$

Претходна једначина посматра редну везу опреме у блоку, док за израчунавање индекса стања минималних пресека је потребно посматрати паралелну везу блокова (Сл. 4.2.2):

$$\begin{aligned}
 I_{e1} &= I_B \cdot I_C \\
 I_{e2} &= I_K \cdot I_G \cdot I_{No}
 \end{aligned}
 \tag{4.2.2}$$



Сл. 4.2.2 Еквивалентни граф минималних пресека а) ВС и б) KGNo

Редна веза свих дванаест минималних пресека подразумева сабирање њихових индекса стања и израчунавање укупног индекса стања разводног постројења  $I_{POS}$ :

$$I_{POS} = \sum_{k=1}^{12} I_{ek}
 \tag{4.2.3}$$

Ако би сваки елемент из Н шеме имао максималну вредност за индекс  $i$ , вредност 1, онда би еквивалентна вредност индекса за цело постројење,  $I_{POS}$ , била максимална и износила би 108. Максимална вредност индекса целог постројења,  $I_{POSmax}$  индицира најгоре могуће стање у постројењу са 100% вероватноћом квара. Индекс  $I_{POS}$  се може изразити у процентима помоћу пропорције:

$$I_{pos}[\%] = \frac{I_{pos} \cdot 100}{I_{posmax}}
 \tag{4.2.4}$$

Дакле,  $I_{pos} [\%]$  је вероватноћа да целокупно разводно постројење није у функцији и поседује квар. Овакав приступ одређивању стања делова разводног постројења и целокупног разводног постројења је публикован у раду [47]. Слично као и код високонапонске опреме, на основу индекса стања могуће је донети одлуку о приоритету одржавања функционалних блокова. Други начин за доношење одлуке јесте применом мапе ризика. Индекс стања представља једну координату мапе ризика.

Друга координата представља значај испитиване опреме. Значај се огледа у цени неиспоручене електричне енергије и може се израчунати на основу интензитета отказа ( $\lambda$ ), очекиваног трајања времена отклањања квара ( $t$ ) и нерасположивости постројења ( $u$ ). Множењем нерасположивости уређаја са његовим оптерећењем ( $I$ ), напонским нивоом ( $U$ ) и ценом електричне енергије ( $c$ ) може се израчунати цена годишњих прекида рада уређаја ( $C$  [€/god]):

$$C = u \cdot I \cdot U \cdot c \quad (4.2.5)$$

Нерасположивост конкретног уређаја из формуле (4.2.5) се дефинише у јединицама [h/god] као:

$$u = t \cdot \lambda \quad (4.2.6)$$

Нерасположивост за блокове високонапонске опреме и комплетног постројења је могуће израчунати методом минималних пресека. Примена методе је истоветна као и за прорачун индекса стања. Прво је потребно одредити нерасположивост за сваки уређај, па за сваки функционални блок и на крају за комплетно разводно постројење.

### 4.3. Примена фази теорије код прорачуна поузданости

Нерасположивост уређаја директно зависи од времена отклањања квара и интензитета отказа. Ова два параметра су улазни подаци за прорачун поузданости и могу се проценити на основу статистике и дијагностике претходних отказа уређаја. Прикупљање података је од суштинског значаја у студијама поузданости и ризика. На основу прикупљених база података могуће је проценити вредности параметара. На основу дијагностике термовизијских прегледа (Таб. 2.5.1) може се закључити да се највећи број топлих места и кварова управо јавља код прекидача, растављача, енергетског трансформатора и струјног мерног трансформатора. Број отказа за четири испитивана елемента високонапонске опреме варира из године у годину. Параметар  $\lambda$  у моделима квара је средња вредност заснована на историјској статистици отказа. Анализа неизвесности у статистици подразумева анализу осетљивости. Многе објављене студије и радови на тему анализе осетљивости у процени ризика у својим прорачунима користе Монте Карло (*Monte Carlo*) симулацију [67], [68], [69], [70]. Због неизвесности и неодређености предложени модел у овој дисертацији користи фази бројеве (Прилог 1 – Фази

теорија) како би заменио Монте Карло симулацију. Све варијације параметара у Монте Карло симулацији покривају функције припадности фази бројева. Разлог увођења модела са фази бројем јесте брзина прорачуна. Интензитет квара се израчунава као просечан број топлих места у години током временског периода од тринаест година за сваки уређај посебно. Процењена вредност интензитета отказа се може израчунати као:

$$\lambda_2 = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} \frac{n_i}{N_i} \quad (4.3.1)$$

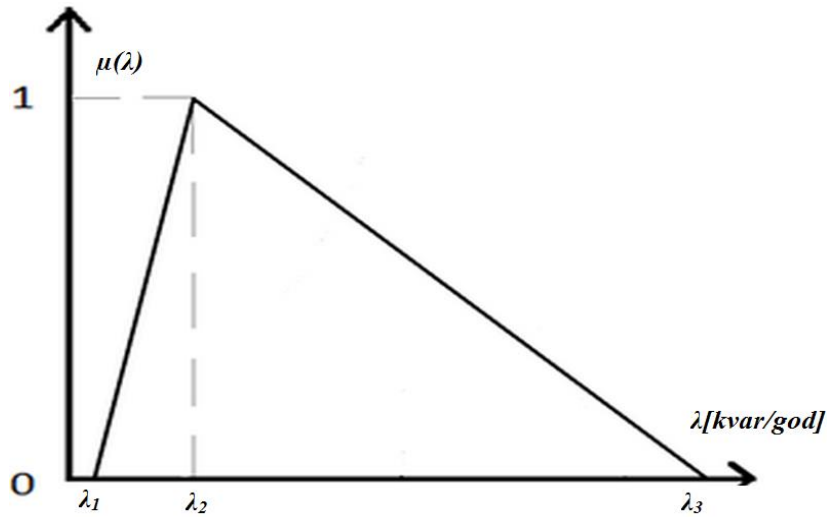
У једначини (4.3.1)  $n$  је број топлих места за неку од тринаест година и тип уређаја, а  $N$  је број испитиваних, тестираних уређаја у тој години. Вредност  $\lambda$  није иста за сваку годину, и да бисмо узели у обзир ову неизвесност,  $\lambda_1$  је минимум а  $\lambda_3$  је максимум интензитета отказа за период од тринаест година.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &\leq \lambda \leq \lambda_3 \\ \lambda_1 &= \min_{i=1,13} \left( \frac{n_i}{N_i} \right) \\ \lambda_3 &= \max_{i=1,13} \left( \frac{n_i}{N_i} \right) \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

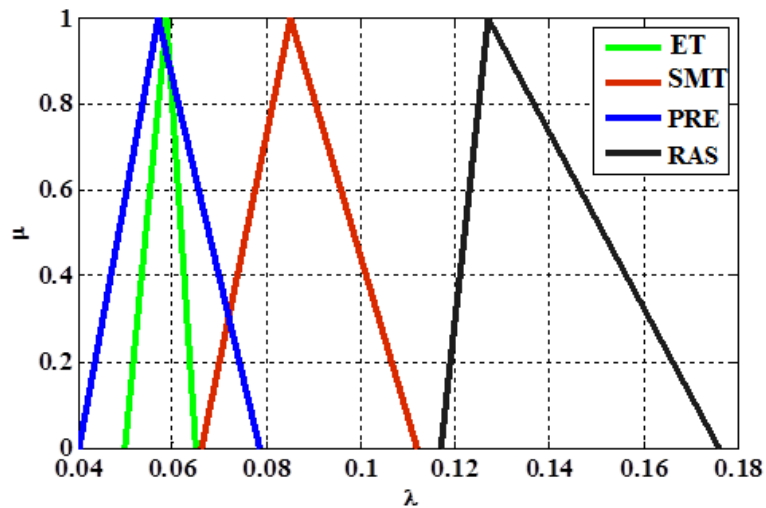
На основу наведеног, моделовани су интензитети отказа у облику троугаоне функције припадности (Сл. 4.3.1). Овакав процес одређивања функције припадности и додељивања променљивој се назива фазификација (Прилог 1 – Фази теорија). На основу Таб. 2.5.1, за четири поменута уређаја су формиране различите функције припадности (Сл. 4.3.2). На Сл. 4.3.1, Сл. 4.3.2, Сл. 4.3.3 и Сл. 4.3.4 ознаком  $\mu$  је обележен степен истинитости функције припадности (Прилог 1 – Фази теорија).

За различите случајеве кварова и прегревања уређаја време трајања поправке – враћања у погон – није исто. Време отклањања квара или трајање времена обнављања ( $t$ ) може се естимирати као фази број на исти начин као и интензитет отказа на основу података у Таб. 4.3.1 преузетих из [66]. Време отклањања квара у форми фази броја за четири поменута уређаја је приказано на Сл. 4.3.3.





Сл. 4.3.1 Интензитет квара у форми фази броја

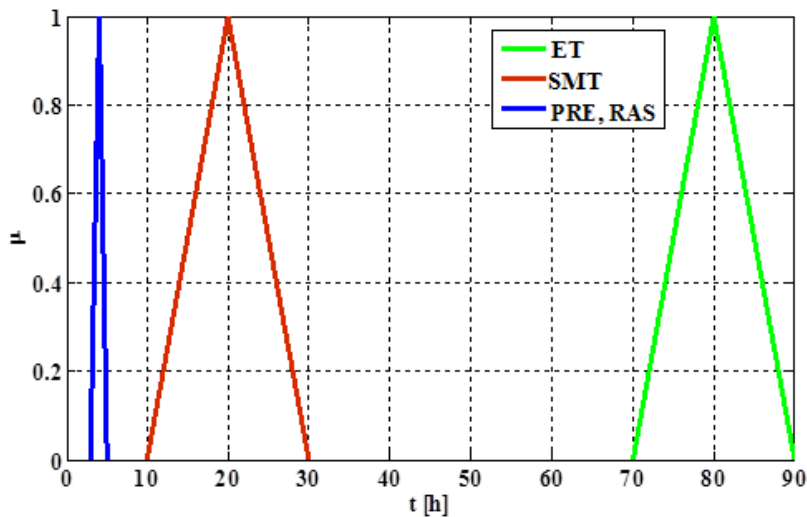


Сл. 4.3.2 Функције припадности интензитета квара за: трансформатор (ET), струјни мерни трансформатор (SMT), прекидач (PRE) и растављач (RAS)

Таб. 4.3.1 Време отклањања квара код различитих уређаја [66]

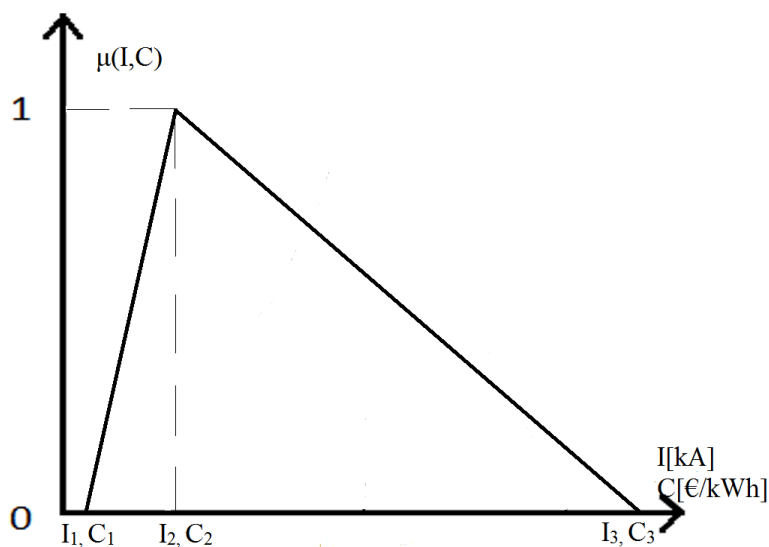
Уређај	Прекидач	Растављач	СМТ	ЕТ
$t$ [h]	[3, 4, 5]	[3, 4, 5]	[6, 10, 14]	[70, 80, 903]

Када се интензитет квара и време отклањања квара одреде у форми фази броја, онда и нерасположивост се добија у форми фази броја као њихов производ. У формули (4.2.5) за прорачун цене неиспоручене електричне енергије поред нерасположивости варира и променљива цена електричне енергије ( $c$ [€/kWh]).



Сл. 4.3.3 Функције припадности времена отклањања квара за: трансформатор (ET), струјни мерни трансформатор (SMT), прекидач (PRE) и растављач (RAS)

Цена електричне енергије је веома променљива и зависи од доста фактора у ЕЕС-у. Иначе, у наплати електричне енергије у ЕЕС-у Србије дефинишу се три тарифе са трима различитим ценама електричне енергије ( $c_1=0.0395$ ,  $c_2=0.059$ ,  $c_3=0.118[\text{€/kWh}]$ ). Ове три вредности карактеришу троугаону функцију припадности цене електричне енергије у форми фази броја. Цена електричне енергије је у корелацији и са струјом као променљивом. Код већег оптерећења већа је цена електричне енергије и обрнуто. Представљање цене електричне енергије у форми фази броја (Сл. 4.3.4) индиректно подразумева и варијацију оптерећења разводног постројења.



Сл. 4.3.4 Цена електричне енергије у облику фази броја

Након множења свих формираних фази бројева цена неиспоручене електричне енергије је такође у форми фази броја:

$$C = t \cdot \lambda \cdot I \cdot U \cdot c \quad (4.3.3)$$

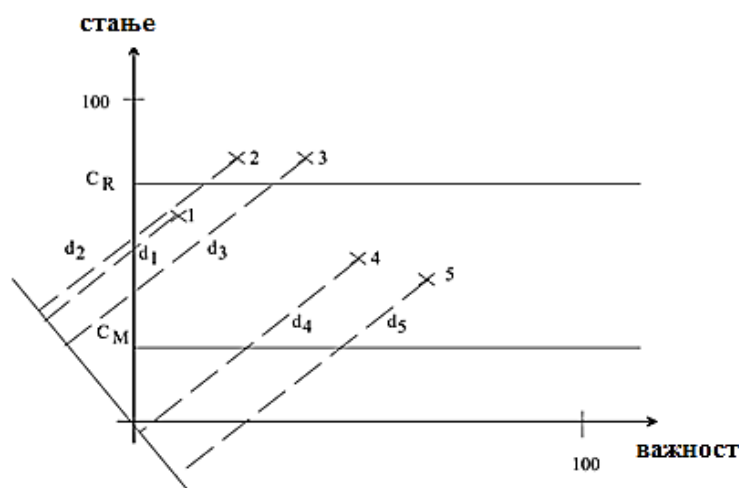
Цена неиспоручене енергије услед квара испитиваног уређаја представља значај тог уређаја у разводном постројењу. Значај уређаја као координата мапе ризика мора да има јединствену вредност из скупа реалних бројева. Реални број од фази броја се добија процесом дефазификације (Прилог 1 – Фази теорија). У дисертацији је коришћен метод центра гравитације масе као најчешће примењиван метод дефазификације. Овакав прорачун са фази бројевима указује на значај опреме у разводном постројењу. Такав резултат је друга координата мапе ризика.

#### 4.4. Мапа ризика и индекс перформанси система

Мапа ризика је дводимензионални дијаграм чије осе вреднују стање испитиване високонапонске опреме и улогу те опреме у ЕЕС-у. Као таква, мапа ризика се код ЕЕС-а користи ради одређивања приоритета за замену и реконструкцију, на темељу стратегије усмерене на поузданост система. Радна група 37.27 у склопу организације CIGRE се бавила истраживањем утицаја старења високонапонске опреме на планирање развоја електроенергетског система. У оквиру тог истраживања [34] инжењери из осамнаест електропривредних предузећа дефинисали су мапу ризика као координатни систем са два осам (C – стање (*eng. condition*), i – важност (*eng. importance*)) са оспегом вредности од 10 до 100. Сваком разматраном уређају, елементу ЕЕС-а, додељују се бодови из поменутог опсега. Већа вредност указује на лошије стање опреме, односно већи значај опреме за ЕЕС. Опрема којој су придружени бодови се разматра у координатном систему и на основу њеног положаја се одређује приоритет замене и реконструкције. На Сл. 4.4.1 положај опреме означене бројем 2 имплицира њено лоше стање и малу улогу у систему, док положај опреме означене бројем 5 имплицира боље стање, али и већу улогу у систему. Приоритети за замену и реконструкцију се одређују на основу координата и дужине пројекција сваке координате на праву која пролази кроз координатни

систем ( $d_1 - d_5$ ). Такође, у оквиру [34] дефинише се стратегија замене само на основу стања опреме:

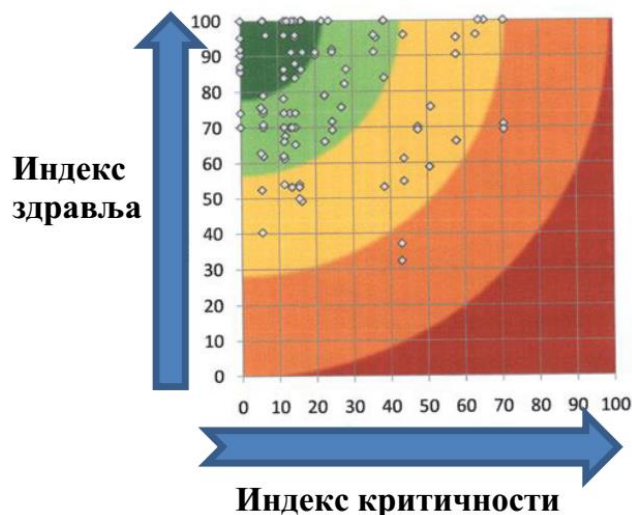
1. за опрему између 100 и  $C_R$  – замена,
2. за опрему између  $C_R$  и  $C_M$  – одржавање, поправка и
3. за опрему између  $C_M$  и 0 – без активности.



Сл. 4.4.1 Одређивање приоритета замене и реконструкције опреме [34]

Главни и највећи недостатак предложене стратегије радне групе CIGRE 37.27 јесте да се стратегија темељи на субјективном приступу и бодовању, без квантификовања било каквих показатеља стања и значаја опреме.

Принцип примене мапе ризика се користи још у радовима [48] и [50] за утврђивање стратегије одржавања ЕТ-а. У раду [48] стање опреме је дефинисано преко индекса здравља (*healthy index*), а значај опреме је представљен као индекс критичности (*criticality index*). Индекс здравља се формира бодовањем на основу показатеља мерних метода за испитивање енергетског трансформатора. Тако дефинисана мапа је приказана на Сл. 3.4.2, где свака тачка представља разматрани ЕТ. У другом раду помиње се дијаграм ризика који, у ствари, представља мапу ризика. Стање опреме је представљено као вероватноћа квара (*probability*), а значај ЕТ-а је дефинисан кроз последице које настају кваром. Тако дефинисан дијаграм (Сл. 4.4.3) мапиран је у три категорије: мало, средње и високо ризично стање ЕТ-а у ЕЕС-у.

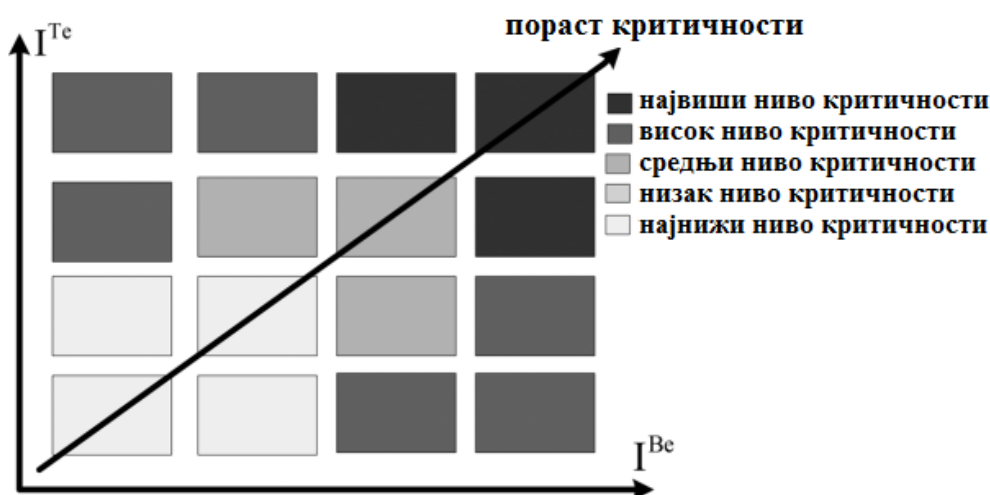


Сл. 4.4.2 Мапа ризика дефинисана на бази индекса здравља енергетског трансформатора [48]



Сл. 4.4.3 Мапа ризика са назначеним нивоима ризичног стања енергетског трансформатора [50]

Мапа ризика је такође примењена и за доношење одлуке код инвестиције у *on-line* мониторинг појединих прекидача разводног постројења [39]. Код оваквог приступа примене мапе ризика дефинисани су параметри:  $I^{Te}$  – који се односи на губитак и  $I^{Be}$  – добит везана за имплементацију мониторинга прекидача. На основу нивоа критичности на Сл. 4.4.4 доноси се одлука о увођењу мониторинга код прекидача.



Сл. 4.4.4 Мапа ризика са назначеним нивоима критичности [39]

Ради избегавања недостатака претходно дефинисаних мапа ризика и комбиновања њихових добрих страна, у раду [47] и у овој дисертацији мапа ризика је дефинисана тако да њена хоризонтална оса представља економске трошкове неиспоручене енергије –  $C$ , док вертикална оса указује у каквом је стању уређај, односно хитност интервенције –  $i$ . Индекс  $i$  представља излазе фази експертских система који се односе на испитивану високонапонску опрему. Применом фази експертских система отклоњено је субјективно бодовање резултата испитивања високонапонске опреме које је присутно у радовима [48], [28] и [29]. Такође, ова координата мапе ризика се може утврдити и за блокове елемената, делове разводног постројења и целокупно постројење помоћу описане методе минималних пресека. На вертикалној осци виша вредност хитности интервенције одговара лошијем стању уређаја, а нижа вредност почетку деградације. Вредности за индекс  $i$  су у опсегу од 0 до 1 и имплицирају 0 до 100% вероватноће квара. Највећи значај за преносни систем има уређај који преноси највише енергије. Рангирање уређаја је кроз вредност  $C$  унето у мапе ризика. Значај уређаја је већи ако он преноси већу енергију и ако његов квар ствара већи економски губитак. Скалирање индекса  $C$  који се рачуна према формули (4.3.3) врши се према:

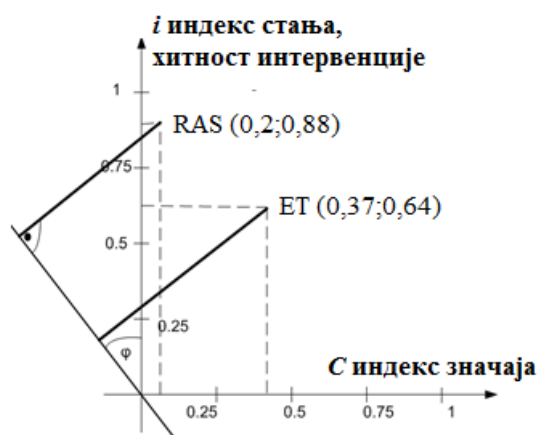
$$C = \lambda \cdot t \cdot \frac{P_d}{P_{d \max}} \cdot c \quad (4.4.1)$$

где је:  $P_d$  – непренесена снага, узрокована конкретним испадом неког уређаја у разводном постројењу,  $P_{d \max}$  – максимална непренесена снага и  $c$  – цена

електричне енергије у форми фази броја. Свака тачка на мапи ризика представља један испитивани уређај разводног постројења. За сваку тачку може се дефинисати крајњи резултат у виду излазне оцене мапе ризика преко пројекције отиска уређаја на изабрану  $\Phi$ -осу. Вредност дужине пројекције  $d_i$ ,  $i$ -тог уређаја на мапи, представља оцену ризика. Што је  $d$  веће, више је критичан уређај. Варијацијом угла  $\varphi$  (Сл. 4.4.5) дефинише се  $\Phi$ -оса и подешава која информација (техничко стање или економски значај уређаја) има већи утицај на доношење одлуке. Ако угао  $\varphi$  има вредност  $45^\circ$ , онда су обе осе на мапи ризика подједнако важне. На овај начин остављено је доносиоцу одлуке да сам процени релевантну ситуацију у разводном постројењу и ЕЕС-у. Одлуку је могуће донети и тако што ће се посматрати и површина сваког уређаја на мапи ризика која директно указује на ризик као производ:

$$R = i \cdot C \quad (4.4.2)$$

Ради илустрације примене мапе ризика на Сл. 4.4.5 су приказане две тачке које се односе на ЕТ и растављач. Координате тачака су за ЕТ ( $C_{ET}=0,37$  и  $i_{ET}=0,64$ ) и растављач ( $C_{RAS}=0,2$  и  $i_{RAS}=0,88$ ). За изабрани угао  $\varphi$  од  $45^\circ$  пројекције удаљености  $d_{TR}$  и  $d_{RAS}$  се могу видети на Сл. 4.4.5. Дужина растојања  $d_{ET}$  је већа од  $d_{RAS}$ , па се може закључити да је трансформатор у критичнијем стању од растављача. Површине ризика су  $R_{ET}=0,237$  и  $R_{RAS}=0,176$  и може се видети да је закључак исти, тј. приоритет ремонта код два испитивана уређаја.



Сл. 4.4.5 Мапа ризика са примерима растављача и ЕТ-а

Мапа ризика је веома корисна и практична за визуелизацију плана одржавања елемената разводног постројења. Такође, постоји и стратегија

одржавања разводног постројења на бази индекса перформанси система (*System Performance Index – SPI*) [51], који се дефинише следећом формулом:

$$SPI = \sum_i \frac{i_{i,стар} - i_{i,нови}}{f_i} \quad (4.4.3)$$

где је:  $i_{i,стар}$  – индекс ризика, вероватноће квара,  $i$ -тог елемента пре ремонта,  $i_{i,нови}$  – индекс ризика,  $i$ -тог елемента након ремонта или замене и  $f_i$  – цена одржавања, поправке или замене  $i$ -тог елемента постројења. Резултати фази експертских система и методе минималних пресека се користе за израчунавање индекса *SPI*. Дакле, ремонт, ревитализација или замена опреме у разводном постројењу се односе на кретање по вертикалној оси мапе ризика (смањење  $i$ ). Додавање нових елемената, нових блокова елемената у разводно постројење подразумева смањење индекса  $C$  и кретање само по хоризонталној оси мапе ризика. Оптимални одабир елемената за ремонт или замену представља оптималну стратегију одржавања и подразумева минимизацију индекса *SPI*. У складу са минимизацијом *SPI* и са коштањем ремонта или додавања елемената могуће је донети одлуке о исправним поступцима у стратегији одржавања електроенергетског система.



## 5. РАЧУНАРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ

### 5.1. Уводна разматрања

Ради анализе перформанси комплетног алгоритма за мониторинг и дијагностику високонапонске опреме у разводном постројењу извршене су рачунарске симулације у програмском пакету MATLAB. Улазни подаци фази модела стања прекидача, растављача, енергетског и мерног трансформатора су узети из истог разводног постројења карактеристичне Н заменске шеме. Додатно је анализиран рад формираних експертских система за дијагностику ЕТ-а на случају улазних података четири ЕТ-а. Резултати експертских система су употребљени у рачунарским симулацијама прорачуна поузданости разводног постројења, који је такође реализован у програмском пакету MATLAB. Резултати симулација су коришћени код мапе ризика и индекса перформанси система ради доношења одлука о одржавању разматраног разводног постројења.

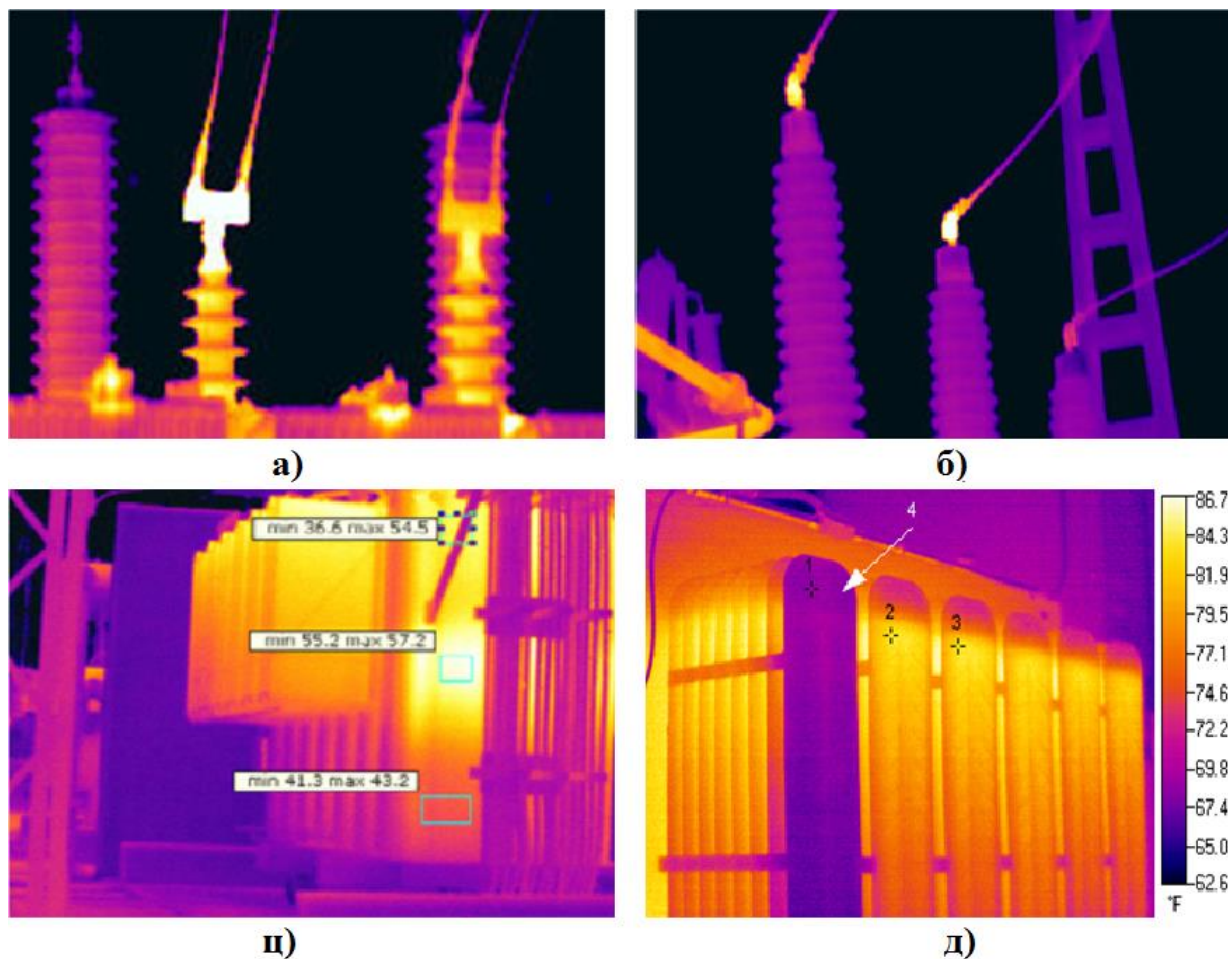
### 5.2. Аутоматизација дијагностике стања високонапонске опреме

Аутоматизација дијагностике стања високонапонске опреме подразумева аутоматско учитавање вредности параметара који се *on-line* мере или су донети на уређајима при теренским *off-line* испитивањима. Ради што бољег мониторинга и дијагностике високонапонске опреме потребно је формирати базе мерења из којих би било омогућено учитавање вредности мерених параметара и тестирање формираних фази модела опреме. На основу такве базе мерења могуће је пратити стања опреме као и ефекте одржавања или ремонта појединих делова опреме.

#### 5.2.1 Анализа рада експертских система за дијагностику ЕТ-а

Као што је већ поменуто, за ЕТ као најбитнији елемент разводног постројења формирана су четири фази модела стања: систем од пет фази експертских подсистема, експертски систем са Mamdani закључивањем, експертски ситем са Sugeno закључивањем и Sugeno експертски систем нултог реда. За анализирање рада формираних фази модела стања ЕТ-а коришћени су улазни подаци и термографске слике четири ЕТ-а различитих напонских нивоа. Термографске слике испитиваних ЕТ-а су приказане на Сл. 5.2.1, а улазни подаци су дати у Таб. 5.2.1. Сл. 5.2.1 а) и б) приказују топла места на улазним проводним изолаторима трансформатора 110/ 35 kV/

kV и 220/ 110 kV/ kV са температурама прегревања 19 и 29 °C. Сл. 5.2.1 ц) приказује проблеме на главном резервоару, јер је температура на средини резервоара ЕТ-а (400/ 220 kV/ kV) виша него на врху резервоара (18,6 °C). Проблематично стање радијатора за ЕТ показује да је температура у првом радијатору нижа за 21,1 °C него у другим радијаторима (Сл. 5.2.1 д)). Резултат оваквог стања је слаба и спора дистрибуција трансформаторског уља унутар ЕТ-а (400/ 110 kV/ kV). Резултати за улазне податке ЕТ-а из Таб. 5.2.1 су приказани у Таб. 5.2.2.



Сл. 5.2.1 Термографске слике четири испитавана ЕТ-а: а) 110/ 35 kV/ kV, б) 220/ 110 kV/ kV, ц) 400/ 220 kV/ kV и д) 400/ 110 kV/ kV

Може се уочити да су резултати експертских система слични, али ипак неки резултати су на страни сигурности, тј. указују на више вредности излаза. Сваки од четири формирана експертска система има своје предности. Систем са *Mamdani* типом закључивања је интуитиван, широко прихваћен и добро је прилагођен људском размишљању. Такође, он омогућава велику дозу неизвесности и несигурности за улазе и излазе преко својих функција припадности.

Таб. 5.2.1 Улазни подаци за четири испитивана ЕТ-а различитих напонских нивоа

Улазни подаци	ЕТ преносни однос	110/ 35 kV/ kV	220/ 110 kV/ kV	400/ 220 kV/ kV	400/ 110 kV/ kV
$CH_4/H_2$ [ppm]		0,3	0,7	3,8	0,08
$C_2H_2/C_2H_4$ [ppm]		0,02	0,03	0,05	0,06
$C_2H_4/C_2H_6$ [ppm]		1,9	2,6	2,8	0,7
$C_p$ [%]		6,2	8,5	2,1	0,95
$tg\delta_{yba}$ [%]		0,01	0,019	0,008	0,005
ASLE		1,8	3,1	1,6	0,6
DABS		0,1	0,15	0,02	0,01
CC		0,97	0,87	0,98	0,99
$I_o$ [%]		5,5	7,2	3,8	0,6
$L\gamma$ [%]		4,5	6,7	3,5	1,7
$tg\delta_{nam}$ [%]		1,6	2,0	1,2	0,4
$IP_{nam}$		1,2	0,65	1,6	1,95
$max(dR_{Cu})$ [%]		5,1	5,8	2,8	1,6
$max(tg\delta_{pi})$ [%]		1,2	1,9	0,75	0,3
$IP_{pi}$		1,1	0,8	1,5	2,2
Температура изолације [°C]		70	87	126	107
Век [година]		10	25	16	4
$\theta_{претходно}$ [°C]		11	18	10	23
$\theta$ [°C]		19	29	18,6	21,1

Таб. 5.2.2 Резултати дијагностике за четири испитивана ЕТ-а различитих напонских нивоа

Експертски систем	ЕТ преносни однос	110/ 35 kV/ kV	220/ 110 kV/ kV	400/ 220 kV/ kV	400/ 110 kV/ kV
Електричне особине намотаја		0,706	0,754	0,493	0,107
Електричне особине проводних изолатора		0,5	0,912	0,304	0,094
Механичке особине намотаја		0,5	0,877	0,39	0,118
Електричне и хемијске особине ЕСИ		0,575	0,625	0,909	0,175
Термографија		0,489	0,898	0,547	0,517
Резултат пет подсистема		<b>0,554</b>	<b>0,813</b>	<b>0,527</b>	<b>0,202</b>
<i>Matdani</i> тип закључивања		<b>0,744</b>	<b>0,899</b>	<b>0,738</b>	<b>0,289</b>
<i>Sugeno</i> тип закључивања		<b>0,5</b>	<b>0,797</b>	<b>0,766</b>	<b>0,218</b>
<i>Sugeno</i> тип закључивања нултог реда		<b>0,55</b>	<b>0,65</b>	<b>0,85</b>	<b>0,15</b>
Хитност интервенције		<b>30 дана</b>	<b>Хитна</b>	<b>30 дана</b>	<b>Добро</b>
Класификација квара		прегревање изолованих проводника	прегревање проводника и механички проблеми	појава топлих места у језгру	парцијално пражњење енергије мале густине

*Sugeno* експертски систем нултог реда је добар начин за класификацију кварова, јер свака константа указује на различиту групу могућих кварова. *Sugeno* експертски систем је компјутерски ефикаснији од *Mamdani* система због изостављања процеса дефазификације. Овај експертски систем је веома сличан експертском систему са пет фази подсистема, јер се сваки улаз може интензивирати кроз коефицијенте линеарне зависности. Дакле, излаз система је збир улаза који су помножени коефицијентима (Прилог 1 – Фази теорија). Стога се овакав систем може назвати линеарни *Sugeno* експертски систем. Код експертског система са пет фази подсистема уноси се више улазних података и узима се у обзир историја тестираног енергетског трансформатора. Код формирања резултата у Таб. 5.2.2 сваки излаз подсистема је равноправан, тј.  $\omega_{1-5}$  узимају вредност 1, тако да је коначни резултат просечна вредност излаза подсистема. Код свих експертских система важи да, ако вредности за неке од улазних параметара недостају, може се узети њихова најлошија, по стање ЕТ-а најкритичнија, вредност. На тај начин експертски системи функционишу на страни сигурности.

### 5.2.2 Валидација рада експертских система за дијагностику ЕТ-а

Ради валидације предложене методе формирања фази модела стања високонапонске опреме у овом поглављу су поређени резултати рада експертских система за дијагностику ЕТ-а са већ постојећим методама. Методе са више улазних параметара за дијагностику стања прекидача, растављача и мерних трансформатора не постоје и нису још увек утврђене стандардима. Методологија која разматра податке прикупљене са различитих мерења параметара и испитивања ЕТ-а је представљена у радовима [48], [28] и [29]. Методологија са индексом здравља (*Health Index – HI*) представљена је у [48], [28], а методологија са индексом стања ЕТ-а (*Transformer Status Indicator – TSI*) представљена је у [29]. Обе методе у себи садрже доста искуства и знања Међународних савета *CIGRE* и *CIREN*. Мање вредности оба индикатора (*TSI* и *HI*) указују на лошије стање ЕТ-а, што значи да ове вредности треба да узимају обрнуте вредности од резултата фази експертског система. У Таб. 5.2.3 се може видети да су резултати експертских система (излаз –  $i$ ) и две методе за поређење слични:  $i$  је  $1-TSI$  и  $i$  је  $1-HI/100\%$ . Може се уочити да све методе указују на исти редослед ЕТ-а у смислу приоритета

одржавања и њиховог стања. Методологија са фази логиком која је представљена у дисертацији је боља од постојеће две методе јер:

- користи директне вредности мерења улазних параметара, док методе са индексима *TSI* и *HI* рангирају улазна мерења бројевима 0, 1, 2, 3 или 4,
- уноси мање субјективности која је присутна код рангирања и
- пружа увид у врсту квара, указује на део опреме са највећом вероватноћом квара и указује на хитност интервенције.

Таб. 5.2.3 Поређење и валидација резултата дијагностике ЕТ-а

Методологија	ЕТ преносни однос [kV/kV]	110/ 35	220/ 110	400/ 220	400/ 110
Резултат пет подсистема		0,554	0,813	0,527	0,202
<i>Mamdani</i> тип закључивања		0,744	0,899	0,738	0,289
<i>Sugeno</i> тип закључивања		0,5	0,797	0,766	0,218
<i>Sugeno</i> тип закључивања нултог реда		0,55	0,65	0,85	0,15
HI [%]		53,572	23,095	32,612	63,624
TSI [0-1]		0,578	0,201	0,267	0,735

### 5.2.3 Тестирање рада експертских система за дијагностику прекидача, растављача и струјног мерног трансформатора

У наредним Таб. 5.2.4, Таб. 5.2.5 и Таб. 5.2.6 су приказани улазни подаци за дијагностику стања прекидача, растављача и СМТ-а. Улазни подаци су коришћени за улазе формираних фази модела стања прекидача, растављача и СМТ-а. За сваки испитивани елемент високонапонске опреме представљена су три сета података који се односе на три случаја дијагностике. За сваки елемент се може уочити да је други случај најкритичнији, односно вредност излаза *i* је највећа. То значи да други испитивани случај захтева хитну интервенцију и највећи приоритет при одржавању, ремонту и замени тог типа елемента високонапонске опреме. Код свих трећих случајева у табелама *i* има најмању вредност. То би значило да има најмању вероватноћу квара и да има најмањи приоритет у смислу плана одржавања. У складу са тим, сви први случајеви испитивања су други по редоследу приоритета одржавања. Улазни подаци и резултати за дијагностику СМТ-а, у складу са формираним експертским системом у поглављу 3.3, представљени су у Таб. 5.2.4.

Таб. 5.2.4 Улазни подаци и резултати дијагностике три СМТ-а

Подаци СМТ	први	други	трећи
Век [година]	20	30	15
$\theta$ [°C]	15	26	5
$tg\delta_{nam}$ [%]	0,8	0,95	0,35
$IP$	1,6	1,85	1,2
$CH_4/H_2$ [ppm]	1,5	0,9	2,2
$\Delta i$ [%]	0,38	0,65	0,15
$\Delta\varphi$ [%]	0,52	0,85	0,35
Хитност интервенције	60 дана	Хитно	Добро
Излаз $i$ [0 - 1]	<b>0,498</b>	<b>0,813</b>	<b>0,196</b>

Таб. 5.2.5 Улазни подаци и резултати дијагностике три растављача

Подаци растављача	први	други	трећи
Век [година]	18	24	8
$\theta$ [°C]	12	25	0
$\theta_{\text{претходно}}$ [°C]	20	25	6
$n_o$	11000	18000	6000
$\alpha$ [%]	2,8	4,9	1,9
$\Delta I$ [%]	3,5	5,1	2,7
$\Delta T$ [%]	11	16	6
Контакти растављача	<b>0,49</b>	<b>0,778</b>	<b>0,141</b>
Покретни делови растављача	<b>0,489</b>	<b>0,77</b>	<b>0,296</b>
Два подсистема	<b>0,4895</b>	<b>0,774</b>	<b>0,2185</b>

Улазни подаци и резултати за дијагностику растављача, у складу са формираним експертским системом у поглављу 3.5, представљени су у Таб. 5.2.5. Резултати дијагностике за три случаја прекидача, у складу са формираним експертским системом у поглављу 3.4, представљени су у Таб. 5.2.6. Резултати комплетних експертских система јасно указују на редослед у приоритету одржавања.

Резултати појединачних подсистема указују на најкритичније делове опреме и тако скраћују време испитивања и проналажења квара високонапонске опреме.

Таб. 5.2.6 Улазни подаци и резултати дијагностике трију прекидача

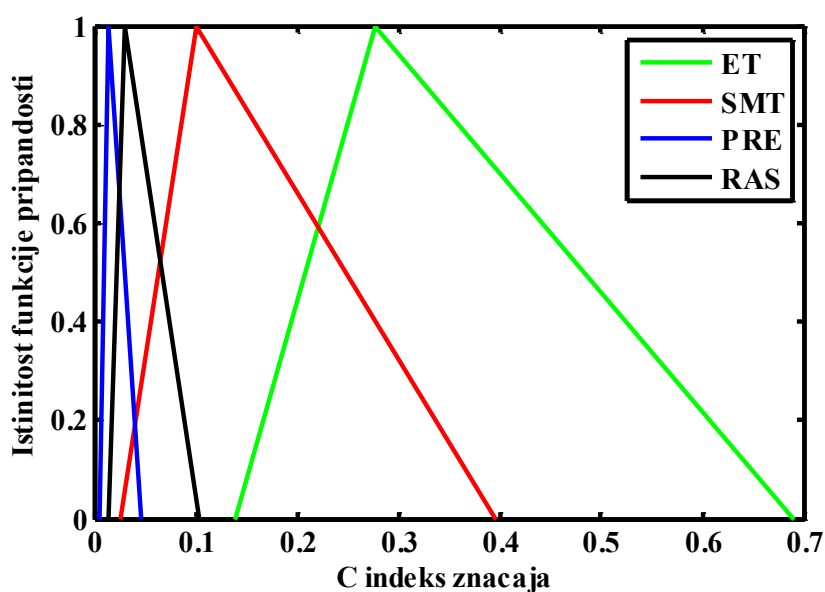
Подаци предкидача	први	други	трећи
Век [година]	20	28	6
$\theta_{\text{претходно}}$ [°C]	15	24	0
$\theta$ [°C]	25	29	10
$n_o$	6000	9000	3000
$\Sigma n \cdot I_{ks}^2$ [A <sup>2</sup> ]	8000	19000	14000
$\Delta R_k$ [%]	40	60	10
$\Theta_{SF6}$ [°C]	60	100	80
$\Delta p$ [%]	0,6	0,9	0,1
$p$ [bar]	6	7,9	6,5
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	46	49	47
$v_k$ [m/s]	3,2	5,9	4,1
$d_k$ [mm]	193	215	205
$\Delta t$ [ms]	1,98	2,5	0,1
$t_r$ [ms]	1	18	15
$t_m$ [ms]	49	79	55
$t_O$ [ms]	19	35	25
$\Delta t_{ON}$ [ms]	3,5	6,5	1
$\Delta t_{OFF}$ [ms]	1,5	2,1	0,5
Контакти прекидача	<b>0,488</b>	<b>0,886</b>	<b>0,35</b>
Комора и медијум прекидача	<b>0,338</b>	<b>0,609</b>	<b>0,133</b>
Погонски механизам	<b>0,705</b>	<b>0,705</b>	<b>0,373</b>
Три подсистема	<b>0,510</b>	<b>0,733</b>	<b>0,285</b>

### 5.3. Аутоматизација дијагностике и доношења одлуке о одржавању разводног постројења

Због једноставности приказа резултата и тестирања формиране методе улазни параметри за четири типа високонапонске опреме у разматраном



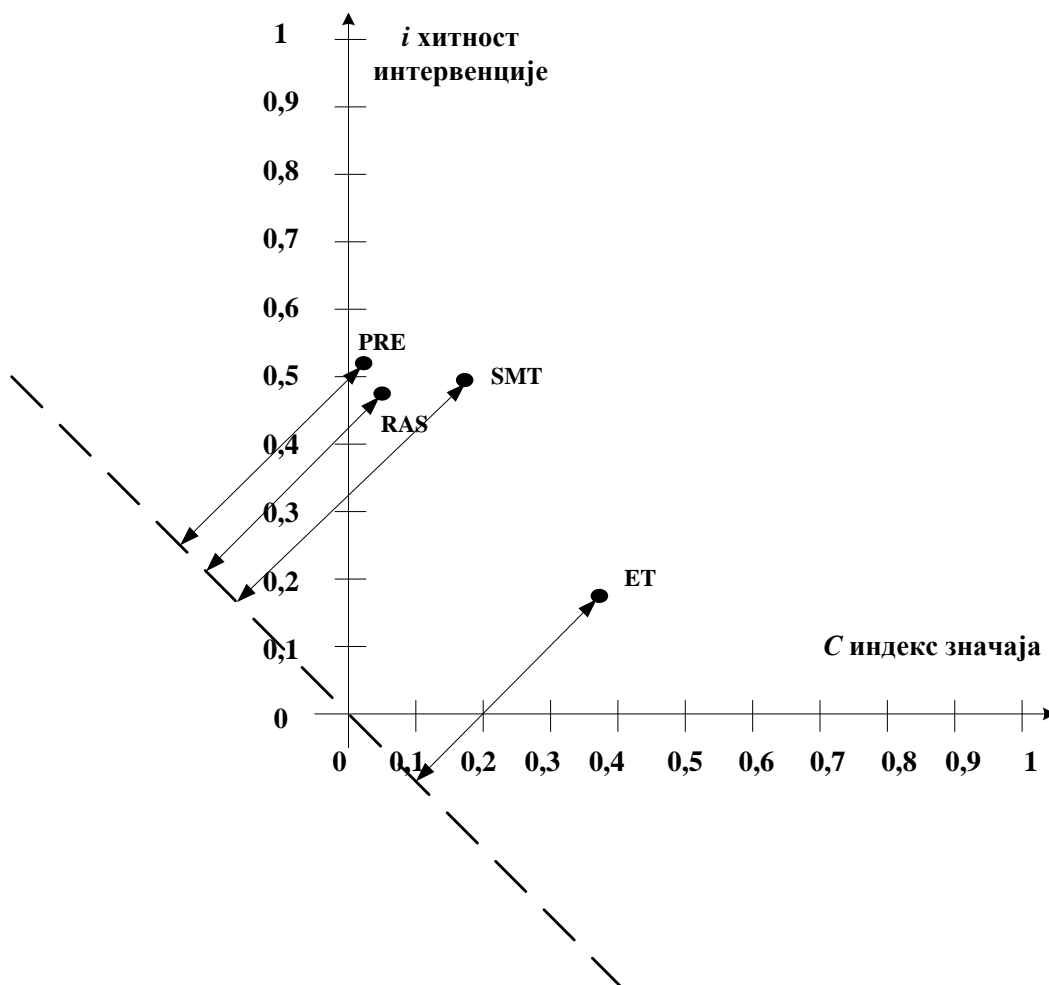
разводном постројењу су исти. Дакле, претпостављено је да су улазни измерени параметри за све прекидаче у разводном постројењу исти, такође исто важи и за остала три елемента разводног постројења. За резултате прекидача, растављача и СМТ-а узет је први случај њихове дијагностике (Таб. 5.2.4, Таб. 5.2.5 и Таб. 5.2.6):  $i_{PRE}=0,510$ ,  $i_{RAS}=0,4895$  и  $i_{SMT}=0,498$ . За резултат дијагностике ЕТ-а узет је случај ЕТ-а преносног односа 110/35 kV/ kV,  $i_{ET}=0,1861$ . На основу ових податка могуће је донети одлуку о приоритету одржавања ова четири елемента. Редослед приоритета одржавања је: прекидач, СМТ, растављач и ЕТ. Међутим, граница за прва три елемента није јасна па је погодно применити мапу ризика за доношење одлуке. Претпоставља се да сви елементи преносе исту снагу, па се значај елемената одређује помоћу формуле (4.4.1) и има изглед у форми фази броја Сл. 5.3.1.



Сл. 5.3.1 Индекс значаја у форми фази броја

Дефазификоване вредности које се уносе на мапу ризика су:  $C_{PRE}=0,0215$ ,  $C_{RAS}=0,0492$  и  $C_{SMT}=0,1743$  и  $C_{ET}=0,3687$ . Када се вредности координата унесу у мапу ризика (Сл. 5.3.2), где је усвојено да је угао  $\phi$   $45^\circ$ , могу се уочити удаљености  $d$  за разматрана четири елемента. На основу мапе ризика редослед приоритета одржавања је: СМТ, прекидач, растављач и ЕТ. Вредности ризика које се добијају множењем вредности  $i$  и  $C$  за сваки елемент имају вредности  $R_{PRE}=0,011$ ,  $R_{RAS}=0,024$ ,  $R_{SMT}=0,087$  и  $R_{ET}=0,069$ . Те вредности представљају површине испод графика. Вредности ризика указују на редослед приоритета одржавања: ЕТ, СМТ,

растављач и прекидач. Редослед приоритета одржавања на основу мапе ризика и вредности ризика није исти. Свакако је корисно имати све резултате и разматрати све случајеве. Другачијим избором угла  $\varphi$  редослед приоритета би варирао, али то се оставља као могућност избора доносиоцу одлуке код одржавања ЕЕС-а. Оно што такође може да утиче на доношење одлуке јесте стање и поузданост појединих делова, блокова, разводног постројења.



Сл. 5.3.2 Мапа ризика коришћена у сврху доношења одлуке о приоритету одржавања високонапонске опреме

Према објашњењима датим у поглављу 4.2 и формули (4.2.1) израчунате су вредности стања појединих делова постројења, блокова у Н шеми (Сл. 4.2.1). Те вредности представљају збир индекса стања све опреме присутне у блоку. Да би вредности између блокова могле да се пореде, потребно је да оне буду релативизоване у односу на своју максималну вредност. Дакле, пошто блок В има четири елемента, максимална вредност његовог индекса стања је 4. Сви индекси

стања блокова су подељени са својим максималним вредностима ( $I_{max}$ ) и помножени са 100%, слично формули (4.2.4). Када се све те вредности саберу, према методи минималних пресека и формули (4.2.3), добије се индекс стања комплетног постројења. Из Таб. 5.3.1 могу се уочити вероватноће квара појединих блокова, делова постројења. На основу само индекса стања види се да је најпотребнија интервенција на блоковима К, L и Н. Вероватноћа квара комплетног постројења на основу тренутног стања опреме у њему је 14,92 %.

Таб. 5.3.1 Резултати методе за процене поузданости и доношења одлуке о одржавању разводног постројења на бази тренутног стања опреме

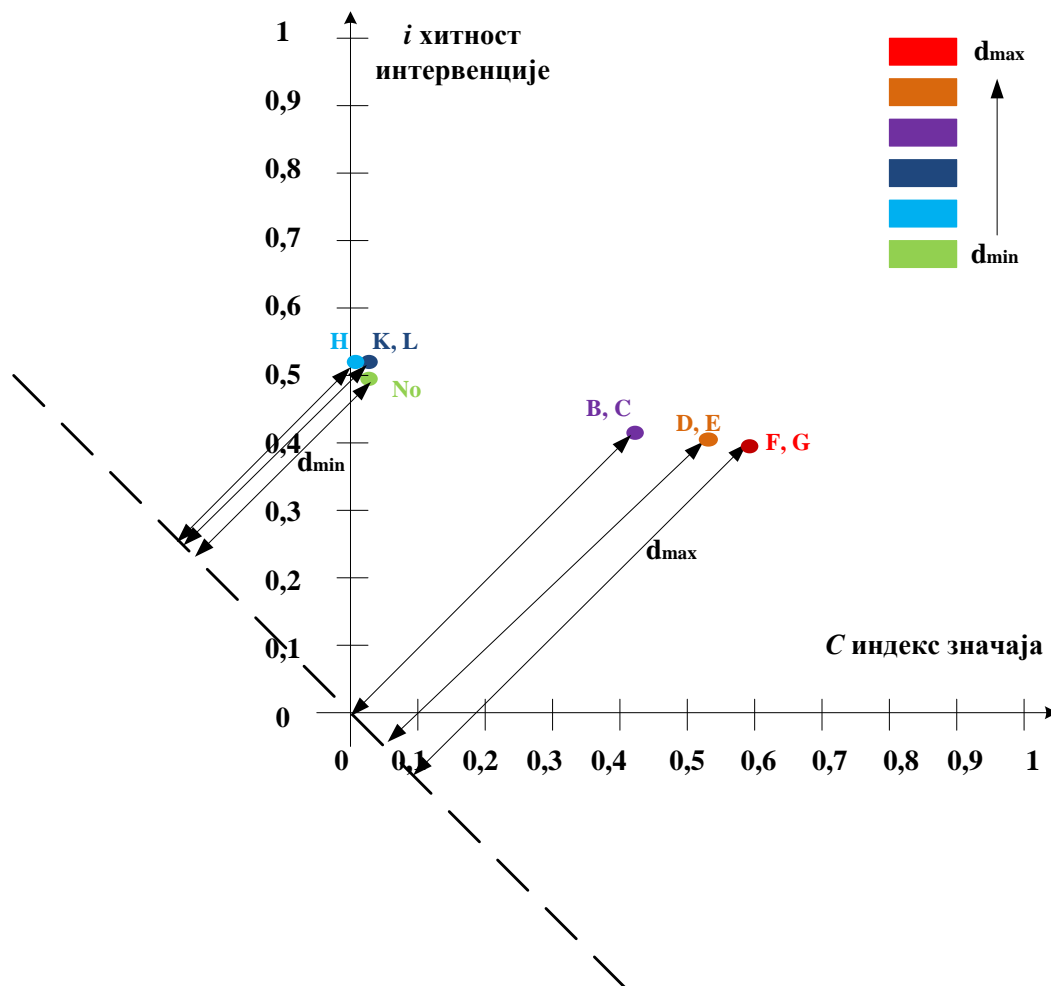
Блок	В, С	D, E	К, L	Н	No	F, G	постројење
Индикатор $I$	1,68	1,65	0,51	0,51	0,49	1,17	16,11
$I/I_{max} \cdot 100\%$	42,09	41,365	51	51	48,95	39,12	14,92
$C$	0,60	0,52	0,02	0,01	0,02	0,59	1,77
$R=I \cdot C/I_{max}$	0,2544	0,2136	0,0110	0,0055	0,0098	0,2317	/

Да би одлуке о одржавању блокова биле анализирани помоћу мапе ризика, потребно је индексе значаја израчунати за сваки блок. Индекс значаја блока је збир индекса значаја свих елемената у блоку помножен са снагом коју тај блок преноси:

$$C_B = C_C = (\lambda_{TR} \cdot t_{TR} + \lambda_{STR} \cdot t_{STR} + \lambda_{RAS} \cdot t_{RAS} + \lambda_{PRE} \cdot t_{PRE}) \cdot \frac{P_{dmax}}{P_{dmax}} \cdot c \quad (5.3.1)$$

$$C_H = (\lambda_{STR} \cdot t_{STR} + \lambda_{PRE} \cdot t_{PRE}) \cdot \frac{0.5 \cdot P_{dmax}}{P_{dmax}} \cdot c$$

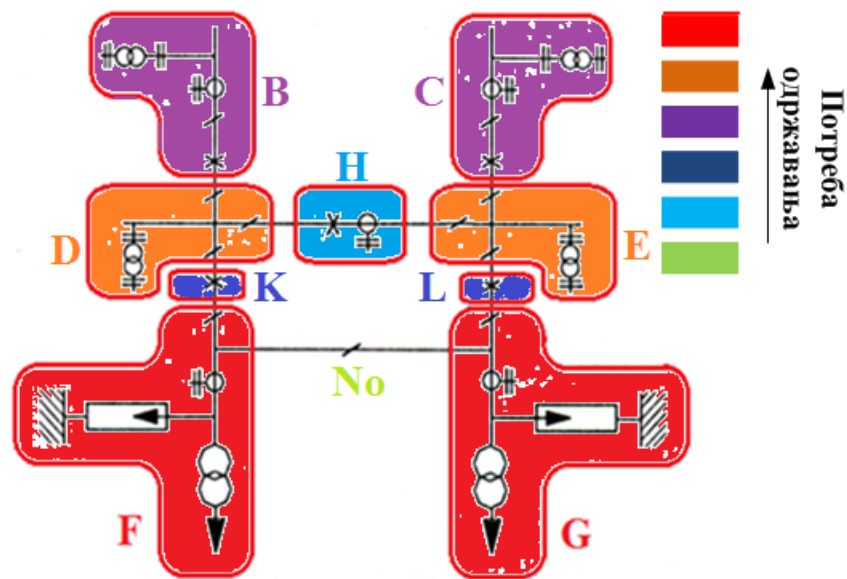
Индекси значаја се могу очитати из треће врсте Таб. 5.3.1, а индекс значаја комплетног постројења је представљен само као збир. У случају упоређивања са неким другим постројењем потребно је тај резултат скалирати и водити рачуна о томе колику енергију преноси друго постројење са којим се пореди. На основу ризика, приоритет одржавања је следећи: В и С, D и E, F и G, К и L, No и Н. На основу резултата из Таб. 5.3.1 попуњена је мапа ризика (Сл. 5.3.3), која указује на приоритет одржавања блокова: F и G, D и E, В и С, К и L, Н и No. Према илустрацији боја код приоритета одржавања, постројење је графички приказано на Сл. 5.3.4.



Сл. 5.3.3 Мапа ризика коришћена у сврху доношења одлуке о приоритету одржавања делова постројења

Резултати фази експертских система и методе минималних пресека из Таб. 5.3.1 се користе за израчунавање индекса перформанси  $SPI$ . Оптимални одабир елемената за ремонт или замену представља оптималну стратегију одржавања и подразумева минимизацију индекса перформанси. Индекс  $SPI$  за шему Н је потребно прво израчунати пре ремонта и реконфигурације постројења:

$$SPI_{pre} = \frac{1}{f_1} \sum_{i=blockova} \sqrt{C_i^2 + I_i^2} = \frac{11,6323}{f_1} \quad (5.3.2)$$



Сл. 5.3.4 Илустрација шеме разводног постројења према потреби за одржавањем

Подаци из Таб. 5.3.2 су разматрани у два случаја. Први случај се односи на планирање реконфигурације шеме Н у смислу да више не постоји блок No и прекидачи у блоковима В и С. У реконфигурацији нова грана, паралелна са блоком Н, са једним новим прекидачем и два нова растављача је додата (блок М). У овом случају се мења само координата С па се стање на мапи ризика мења само хоризонтално. Дакле, индекс значаја је промењен за блокове В, С, No и М.  $SPI$  за нову конфигурацију има вредност  $10,3158 / f_2$ . Посматрајући само бројну вредност у изразу за  $SPI$  може се закључити да је боља нова конфигурација. Међутим цена нове конфигурације такође утиче на доношење одлуке. Пошто је  $SPI$  оригиналне шеме веће, може се закључити да је оно боље само у случају да је коштање нове конфигурације,  $f_2$ , мања од 88% од почетне иницијалне цене,  $f_1$ .

Други случај се односи на одлуку о поправци, ремонту појединих елемената у разводном постројењу. Одлуку је потребно донети између блокова В и С или D и E. У овом случају за блокове елемента се мења само  $i$ , па се на мапи ризика врше једино вертикални помераји. У прорачуну нових индекса стања за блокове В и С или D и E употребљене су вредности:  $i_{PRE} = 0,1368$ ,  $i_{RAS} = 0,1111$  и  $i_{SMT} = 0,1738$  и  $i_{ET} = 0,1361$ . Ове вредности су мање од постојећих вредности индекса стања опреме јер се вероватноћа квара смањила након њихових поправки. Нове вредности за индексе  $SPI$  након ремонта појединих блокова могу бити израчунате помоћу формула:

$$\begin{aligned}
 SPI_{BC} &= \frac{1}{f_{BC}} \sum_{i=\text{blokovi}} \sqrt{C_i^2 + I_i^2} = \frac{9,6148}{f_{BC}} \\
 SPI_{DE} &= \frac{1}{f_{DE}} \sum_{i=\text{blokovi}} \sqrt{C_i^2 + I_i^2} = \frac{7,5438}{f_{DE}}
 \end{aligned}
 \tag{5.3.3}$$

Пошто је  $SPI_{BC}$  веће од  $SPI_{DE}$ , може се закључити да је поправка блокова D и E боља. Међутим, ако се посматра однос  $SPI_{DE} / SPI_{BC}$ , може се закључити да, ако је цена поправке блокова D и E,  $f_{DE}$ , мања од 75,8 % цене  $f_{BC}$ , онда приоритет за поправку имају блокови B и C.

Таб. 5.3.2 Резултати примене методе минималних пресека и подаци потребни за прорачун  $SPI$

Индикатори	$I_{\text{пре поправке}}$	$C_{\text{пре реконфигурације}}$	$I_{\text{после поправке}}$	$C_{\text{после реконфигурације}}$
Блок				
B, C	1,6836	0,6045	0,5578	0,5922
D, E	1,6546	0,5163	0,4694	0,5163
K, L	0,5100	0,0215	0,7034	0,0215
H	0,5100	0,0108	0,7034	0,0108
No	0,4895	0,0200	0,8760	/
F, G	1,1736	0,5922	1,9768	0,5922
M	0	/	2,4553	0,0600
$SPI$	$11,6323/f_1$	$11,6323/f_1$	$9,6148/f_{BC}$ или $7,5438/f_{DE}$	$10,3158/f_2$

## 6. ЗАКЉУЧАК

У овој дисертацији је обрађена проблематика мониторинга и дијагностике стања прекидача, растављача, ЕТ-а и СМТ-а у високонапонском разводном постројењу. На основу таквог стања разматрана је дијагностика стања комплетног разводног постројења и доношење одлуке о његовом одржавању. Поред кратког прегледа актуелних *on-line* и *off-line* метода за мониторинг високонапонске опреме, дат је детаљан приказ индикатора који указују на стање прекидача, растављача, ЕТ-а и СМТ-а. На основу резултата постојећих мерних метода којим се испитује високонапонска опрема развијена је нова метода за дијагностику базирана на термографији и примени фази теорије. Нова метода за дијагностику високонапонске опреме у разводном постројењу заснива се на формирању фази експертских система који представљају фази моделе опреме.

У дисертацији је формиран експертски систем ЕТ-а који се састоји од пет подсистема који указују на: електричне особине намотаја, механичке особине намотаја, електричне особине проводних изолатора, хемијске и електричне особине електроизолационог система и термографску слику. Додатно је формиран јединствен фази експертски систем који сумира све улазе метода испитивања и мониторинга ЕТ-а. Ради анализе осетљивости анализирана је примена *Mamdani* и *Sugeno* начина закључивања фази експертског система. Представљен експертски систем СМТ-а је сличан јединственом фази експертском систему ЕТ-а. Експертски систем прекидача састављен је од подсистема за: контакте прекидача, комору и медијум за гашење електричног лука и погонски механизам прекидача. Фази модел растављача је формиран тако да указује на кварове: контакта и покретних делова растављача. Резултати тестирања рада свих експертских система указују на њихов адекватан рад. Тестирањем експертских система за ЕТ разматран је утицај појединих улазних индикатора и поузданост рада система. Резултати су поређени са резултатима малог броја постојећих метода за дијагностику ЕТ-а. Резултати које пружају сви формиранни експертски системи су информације о: групи могућих кварова, вероватноћи квара и хитности интервенције. Хитност интервенције може упозорити електроинжењере о потреби одржавања и дати му временски рок. Класификација квара указује на

највероватније кварове појединих делова високонапонске опреме и на тај начин скраћује време проналажења и отклањања квара. Све информације су корисне јер у неким ситуацијама је добро имати резултате различитих експертских система, јер могу да укажу на вероватноћу одређеног квара ЕТ-а. Сви фази модели се могу користити, посебно када постоје различити инжењери и стручњаци у доношењу одлука о одржавању високонапонске опреме. Формирани експертски системи могу брзо и аутоматизовано да раде са постојећим улазним индикаторима испитивања високонапонске опреме.

Одлуку о одржавању високонапонске опреме је могуће донети не само на основу њеног стања већ и на основу њеног значаја у разводном постројењу и утицају на друге елементе ЕЕС-а. У ту сврху постојећа метода минималних пресека је модификована за рад са фази бројевима који се естимирају из статистике кварова високонапонске опреме. Таква метода пружа као резултате стање и значај делова разводног постројења и комплетног постројења. Такви подаци се користе код мапе ризика ради доношења одлуке о приоритету правилног одржавања високонапонске опреме и разводног постројења. Поузданост одлука о одржавању је разматрана поређењем одржавања на основу ризика. Одлуке о одржавању делова постројења и реконфигурацији разводног постројења су разматране кроз прорачун индекса перформансе система. Индекс перформансе система узима у обзир економске трошкове одржавања и реконфигурације. Све методе су тестиране на разводном постројењу Н заменске шеме. Резултати свих метода за доношење одлуке указују на могућност аутоматизованог доношења одлуке и директне примене резултата аутоматизоване дијагностике стања високонапонске опреме.

На основу свега реченог може се извести закључак да је за потребе мониторинга и дијагностике стања високонапонске опреме потребно вршити што већи број *on-line* мерења и статистичку анализу што већег броја релевантних показатеља стања. У ову сврху се може користити новоразвијена метода на бази фази теорије, која у односу на остале методе нуди објективност и интеграцију знања експерата. Даља истраживања у оквиру формираних фази модела високонапонске опреме се односе на модификације у складу са улазним подацима. Већи број мерења улазних података олакшаће тестирање система и



формирање адекватне базе правила. Такође, статистика мерења улазних података омогућиће адекватније формирање функција припадности. Наравно, ово се односи на то да је за поједине произвођаче опреме потребно прикупити што већи број података и формирати што адекватније јединствене фази експертске системе. Аутоматизована метода дијагностике стања опреме омогућава и аутоматизовано доношење одлука о одржавању и реконфигурацији разводног постројења. Овакве методе се могу проширити и на делове ЕЕС-а. Њихова велика предност је што директно користе резултате мерења и испитивања елемената ЕЕС-а и могу да узму у обзир и статистику отказа коју уносе у прорачун поузданости. Број сензора који прикупљају податке мерења као и број *on-line* мерних метода за испитивање високонапонске опреме расте. Све је више компанија које се баве аутоматизацијом дијагностике ЕЕС-а и оне нуде формирање све већег броја *on-line* доступних база података. На основу тога, употреба представљених метода и модела је актуелна и њихов развој и потпуна примена се тек очекују.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Žarkovic and Z. Stojkovic, "Artificial intelligence based thermographic approach for high voltage substations risk assessment," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 14, pp. 1935-1945, 2015.
- [2] M. A. Martins, "Condition and risk assessment of power transformers: a general approach to calculate a Health Index," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 26, p. 9–16, 2014.
- [3] G. Gavrilovs, "Technical Condition Asset Management of Power Transformers," in *2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, Manchester, 2011.
- [4] IEC, "IEC 60076-18: Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response," 2012.
- [5] M. Duval, "Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle," in *TechCon Asia Pacific*, Sydney,, 2006.
- [6] IEEE, "IEEE C.57-104-1991 IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers," New York, 1991.
- [7] IEEE, "IEEE C.57-104-1978 Guide for the detection and the determination of generated gases in oil-immersed transformers and their relation to the serviceability of the equipment," 1991.
- [8] M. VM., "Loading Transformers by Temperature," *AIEE Transactions*, vol. 67, pp. 113-122, 1948.
- [9] C. Jones, "CIGRE Working Group 13.09 - Monitoring and Diagnostic Techniques for Switching Equipment," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*, Atlanta, 2011.

- [10] J. N. Kolibas, "Asset not performing – What to do next?," in *Proceedings of the Second IASTED International Conference*, Crete, 2002.
- [11] W. Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 918 - 923, 2002.
- [12] MATLAB, "Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide,," The MathWorks Inc, 2009.
- [13] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 2004..
- [14] A. Bakar, H. Illias, M. Othman and H. Mokhlis, "Identification of failure root causes using condition based monitoring data on a 33 kV switchgear," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 47, p. 305–312, 2013.
- [15] A. I. Vasilchikov, J. A. Dementev and V. N. Czarev, "Problems of life cycle optimization of EHV substation equipment with regard to structural and technical variations of adjoining power network," in *CIGRE*, Paris, 2000.
- [16] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh and M. Lehtonen, "Priority Assessment of Online Monitoring Investment for Power System Circuit Breakers—Part I: Qualitative-Quantitative Approach," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 28, no. 2, pp. 928-938, 2013.
- [17] A. Bozorgi, M. M. Pedram and G. R. Yousefi, "Unit Maintenance Scheduling: A robust model, based on fuzzy cost factors and peak loads," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 79, p. 142–149, 2016.
- [18] A. Pölt and M. Lane, "Field Experiences with HV Circuit Breaker Condition Monitoring," ABB, 2011.
- [19] A. U. Adoghe, C. O. A. Awosope and J. C. Ekeh, "Asset maintenance planning in electric power distribution network," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 47, p. 424–435, 2013.
- [20] B. Rusek, G. Balzer, M. Holstein and M.-S. Claessens, "Timings of high voltage circuit-breaker," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 2011-2016, 2008.

- [21] B. Canizes, J. Soares, Z. Vale and H. M. Khodr, "Hybrid fuzzy Monte Carlo technique for reliability assessment in transmission power systems," *Energy*, vol. 45, pp. 1007- 1017, 2012.
- [22] B. Canizes, J. Soares, Z. Vale and H. Khodr, "Hybrid fuzzy Monte Carlo technique for reliability assessment in transmission power systems," *Energy 45*, vol. 45, pp. 1007-1017, 2012.
- [23] B. Yssaad, M. Khiat and A. Chaker, "Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, p. 108–115, 2014.
- [24] CIGRE, "Ageing of the system – Impact on planning," CIGRE, Paris, 2000.
- [25] CIGRE, "Mechanical condititon assessment of transformer winding using Frequency Response Analysis (FRA)," Cigre, Paris, 2008.
- [26] C. Perrier, M. Marugan, M. Saravolac and A. Beroual, "DGA comparison between ester and mineral oils," in *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2011.
- [27] D. Zhang, W. Li, X. Xiong and R. Liao, "Evaluating Condition Index and Its Probability Distribution Using Monitored Data of Circuit Breaker," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, p. 965–978, 2011.
- [28] D. Piasson, A. A. BÍscaro, F. B. Leão and J. R. S. Mantovani, "A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 137, p. 41–50, 2016.
- [29] D. Reichelt, A. Frey and M. Schonenberger, "Life Expectancy of Power System Apparatus and Components," in *Cigre*, Paris, 1996.
- [30] E. Kornatowski and S. Banaszak, "Diagnostics of a Transformer's Active Part With Complementary FRA and VM Measurements," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 29, NO. 3, JUNE 2014, vol. 29, no. 3, pp. 1398 - 1406, 2014.

- [31] E. A. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electric Power Systems Research*, vol. 142, p. 36–46, 2017.
- [32] G. Balzer, O. Schmitt, A. Schneider, S. Gal, F. Balasiu and K. Bakic, "Life cycle assessment of substations: A procedure for an optimiyed asset management," in *CIGRE*, Paris, 2002.
- [33] H. Malik, A. K. Yadav, S. Mishra and T. Mehto, "Application of neuro-fuzzy scheme to investigate the winding insulation paper deterioration in oil-immersed power transformer," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, p. 256–271, 2013.
- [34] H. Gea and S. Asgarpoorb, "Parallel Monte Carlo simulation for reliability and cost evaluation of equipment and systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, p. 347–356, 2011.
- [35] Siemens, "High voltage Circuit- Breakers: Trends and Recent Developments," Siemens AG, Energy Sector, Erlangen, Germany, 2011.
- [36] IEC, "IEC 62271:2007: High-voltage alternating-current circuit-breakers," IEC, 2007.
- [37] IEC, "IEC 599: Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service," 1978.
- [38] IEC, "IEC 60599: Guide to the interpretation of dissolved and free gases," 1999.
- [39] IEEE, "IEEE Std C37.10: Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers," IEEE, 2002.
- [40] IEEE, "IEEE 493-2007: Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems," IEEE, 2007.
- [41] IEEE, "IEEE Standard C57.12.10-2010 - IEEE Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers," IEEE, New York, 2010.

- [42] IEEE, "IEEE Standard C57.91-2011 - IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators," IEEE, 2011.
- [43] IEEE, "IEEE Std C57.149: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers," IEEE Power and Energy Society, New York, 2012.
- [44] J. Endrenyi, S. Aboresheid and R. Allan, "The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, November 2001, vol. 16, no. 4, pp. 638 - 646, 2001.
- [45] J. Heo, M. Kim and J. Lyu, "Implementation of Reliability-Centered Maintenance for transmission components using Particle Swarm Optimization," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, p. 238–245, 2014.
- [46] J. LIN, C. XIONG and J. FU, "Online monitoring and fault diagnostics of mechanical conditions of high-voltage disconnecter," in *21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [47] J. Nahman and V. Mijailović, Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije, Beograd: Akademska misao, 2009.
- [48] J. Secue and E. Mombello, "Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers," *Electric Power Systems Research* 78 (2008), vol. 78, p. 1119–1128, 2008.
- [49] K. Meštrović, M. Poljak, M. Vidović, M. Furčić, M. Lončar, I. Maras and A. Mik, "NEW CONCEPT OF HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR ON-LINE MONITORING SYSTEM," in *16th International Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2009*, Cape Town, 2009.
- [50] L. Ning, W. Wu, B. Zhang and P. Zhang, "A time-varying transformer outage model for on-line operational risk assessment," *Electrical Power and Energy Systems* 33 (2011) 600–607, vol. 3, p. 600–607, 2011.
- [51] M. Kamei and O. Takai, "Influence of Sensor Information Accuracy on Condition-Based Maintenance Strategy for GIS/GCB Maintenance," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 2, APRIL 2011, vol. 26, no. 2, pp. 625-631,

2011.

- [52] M. Žarković and Z. Radojević, "Procena pouzdanosti napajanja distributivne mreže," in *Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, Jahorina, 2014.
- [53] J. Naderian, R. Piercy, S. Cress, J. Service and F. Wang, "An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 20-34, 2009.
- [54] P. Dehghanian, T. Popovic and M. Kezunovic, "Circuit Breaker Operational Health Assessment via Condition Monitoring Data," in *North American Power Symposium (NAPS)*, Pullman, USA, 2014.
- [55] P.-C. Lin, J.-C. Gu and M.-T. Yang, "Intelligent maintenance model for condition assessment of circuit breakers using fuzzy set theory and evidential reasoning," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 7, p. 1244–1253, 2014.
- [56] P. Tamilselvan and P. Wang, "Failure diagnosis using deep belief learning based health state classification," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 115, p. 124–135, 2013.
- [57] S. M. Strachan, S. D. J. McArthur, B. Stephen, J. R. McDonald and A. Campbell, "Providing Decision Support for the Condition-Based Maintenance of Circuit Breakers Through Data Mining of Trip Coil Current Signatures," *IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 22, NO. 1, JANUARY 2007, vol. 22, no. 1, pp. 179-186, 2007.
- [58] ABB, "Special Report High-voltage products," ABB The corporate technical journal, Zurich, 2013.
- [59] SRPS, "SRPS EN 61869-2:2014 Merni transformatori — Deo 2: Dodatni zahtevi za strujne transformatore," SRPS, Beograd, 2014.
- [60] V. CS and C. G., "Health index as one of the best practice for condition assessment of transformers and substation equipments – Hungarian experience," in *CIGRE*, Парис, 2014.

- [61] W. Li, J. Q. Zhou, K. G. Xie and X. Xiong, "Power system risk assessment using a hybrid method of fuzzy set and Monte Carlo simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 336-343, 2008.
- [62] W. Wangdee and R. Billinton, "Reliability-performance-index probability distribution analysis of bulk electricity systems," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 189 - 193, 2005.
- [63] X. Zhang and E. Gockenbach, "Age-dependent maintenance strategies of medium-voltage circuit-breakers and," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, p. 1709–1714, 2011.
- [64] M. Žarković and Z. Stojković, "Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 125-136, 2017.
- [65] Z. Radakovic, E. Cardillo and K. Feser, "The influence of transformer loading to the ageing of the oil-paper insulation," in *XIII International Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [66] Д. Наумовић-Вуковић, Д. Саламон, Ј. Микуловић, Ј. Лукић, Д. Теслић, Љ. Николић and Љ. Николић, "ИС-ЕМС 412:2013 Испитивање струјних мерних трансформатора," ЕМС, Београд, 2013.
- [67] ИНТ, "Извештај испитивања трансформатора у ТС Крушевац 4," ЈП ЕПС, Краљево, 2015.
- [68] Д. Наумовић-Вуковић, Д. Саламон, Ј. Микуловић, Ј. Лукић, Д. Теслић, Љ. Николић and Љ. Николић, "ИС-ЕМС 413:2013 Испитивање напонских трансформатора," ЕМС, Београд, 2013.
- [69] J. H. Jürgensen, L. Nordström and P. Hilber, "Individual failure rates for transformers within a population based on diagnostic measures," *Electric Power Systems Research*, vol. 141, p. 354–362, 2016.
- [70] Љ. Николић, Ђ. Јовановић, Д. Теслић, Б. Пејовић and С. Маринковић, "Интерни стандард ЈП ЕМС ИС-ЕМС 402:2013 Енергетски трансформатори - испитивања и контроле у погону," ЕМС, Београд, 2013.



[71] Љ. Николић, Ђ. Јовановић, Д. Теслић, Б. Пејовић and С. Маринковић,  
"Интерни стандард ЈП ЕМС ИС-ЕМС 401:2013 Енергетски трансформатори -  
пријемна испитивања," ЕМС, Београд, 2013.

[72] С. Ребрић, Б. Грујичић, А. Поповић, Г. Ралетић and В. Милановић, "ИС-ЕМС  
411:2015 Интерни стандард Мерни трансформатори," ЕМС, Београд, 2015.

i

## ПРИЛОЗИ

## Прилог 1 – Фази теорија

Одлика многих социјалних, техничких и економских система јесте да не располажу веома прецизним улазним подацима, већ много чешће подацима у чијим вредностима постоји неизвесност, тј. нису довољно прецизни. Најчешће се лице одговорно за доношење одлука приликом процеса одлучивања или решавања проблема користи искуством, интуицијом и субјективном оценом неких параметара. Задаци овог типа су врло често превише сложени за квантитативно разумевање, док људи успевају да их реше користећи знање које је пре непрецизно него прецизно. Због тога се јавила потреба за коришћењем математичких метода, које могу да на задовољавајући начин третирају неизвесност, неодређеност и субјективност. Поставило се питање на који начин би компјутерски могло да се представи експертско знање, које у себи садржи нејасне и вишезначне термине? Ова непрецизност или нејасноћа јесте језгро фази скупова и фази логике. Применом теорије фази скупова, односно фази логике при решавању проблема у различитим областима остварен је значајан напредак у технолошком развоју.

Теорија фази скупова (*fuzzy set theory*) – нејасних, расплнутих скупова – уведена је са основним циљем да се на математички формализован начин репрезентује и моделује неодређеност у лингвистици. Као таква, она представља погодан математички апарат за решавање проблема који у себи садрже неизвесност, неодређеност, вишезначност и субјективност. Једна од најважнијих особина теорије фази скупова јесте њена могућност да изрази степен неодређености у човековом мишљењу и његову субјективност. Као таква, фази логика представља апроксимативно резонување које се користи у експертским системима за доношење одлуке на бази правила насталим из искуства.

Први пут фази теорија је увео 1930. године пољски филозоф Јан Лукашијевич (*Jan Lukasiewicz*). Први рад посвећен фази скуповима објавио је 1965. године у Сједињеним Америчким Државама професор Лотфи Задех (*Lotfi Zadeh*). У теорији класичних, јасних скупова, неки одређени елемент или припада или не припада неком дефинисаном скупу. Другим речима, припадност елемента скупу је крајње дистинктна. Фази скуп је, у том смислу, генерализација класичног скупа. Задех је у својој теорији фази скупова увео коришћење функције

припадности (*membership function*). Функција припадности узима вредности из интервала  $[0,1]$  за све елементе из класичног скупа над којим је дефинисан фази скуп, означавајући на тај начин степен припадности сваког појединачног елемента фази скупу. Другим речима, функција припадности фази скупа пресликава сваки елемент универзалног скупа у поменути интервал реалних бројева. Једна од највећих разлика између класичних и фази скупова јесте у томе што класични скупови увек имају јединствену функцију припадности, док се за фази скуп може дефинисати бесконачно много различитих функција припадности којима се он може описати. Поменути научник је дефинисао и основе фази логике (*fuzzy logic*) за логичко описивање нејасноће, која може да се сматра уопштавањем бинарне Булове логике (*Boolean logic*). За разлику од Булове логике, код које се користе искључиво две вредности („0“ – нетачно и „1“ – тачно), фази логика располаже свим вредностима из интервала  $[0,1]$  (где „0“ означава апсолутно нетачно, а „1“ апсолутно тачно), којима се осликава степен припадности неког елемента неком скупу, односно степен истинитости неке тврдње. Ово је главна разлика између класичне и фази теорије скупова, односно бинарне и фази логике: уклања се једнозначна, црно-бела слика и уводе „нијансе“ сиве боје, узимајући у обзир да нека тврдња истовремено може да буде и делимично тачна и делимично нетачна. Ово је приказано на Сл. П1. 0.1.



Сл. П1. 0.1 Истинитост одређене тврдње у фази логици

Лотфи Задех је такође увео и фази бројеве (као посебан случај фази скупова), као и одговарајућа правила за доследно вршење математичких операција над њима – фази аритметику. Након тога је започело објављивање мноштва радова на ту тему, посвећених, како даљем развоју теорије, тако и решавању одређених практичних проблема.

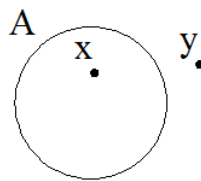
Фази логика није исто што и вероватноћа. Основна разлика састоји се у томе да фази логика оперише са детерминистичким недореченостима и неодређеностима, док се вероватноћа бави веродостојношћу стохастичких догађаја и иза ње суштински стоји експеримент. Фази логика има за циљ

превазилажење проблема у комуникацији везаних за разлике између правила која намећу формалне теорије и начина размишљања који описују понашање људског ума, док се вероватноћа генерално бави феноменом понављања који се симболизује случајношћу. Другим речима, фази и случајни су два атрибута који се разликују у својој природи, односно они описују другачији аспект неодређености. Фази логика покрива субјективност људског мишљења, осећања, језика, док вероватноћа покрива објективну статистику у природним наукама. Аналогно, фази модели и модели формиран на бази вероватноће носе другачији вид информација: фази функција припадности представља сличност објеката у контексту непрецизне дефиниције особина, док вероватноћа даје информацију о фреквенцији понављања.

Фази теорија се може објаснити кроз фази скупове, фази бројеве и фази логику. Поменути термини се највише користе појединачно или у комбинацији у великом броју научних радова.

#### *Фази скупови*

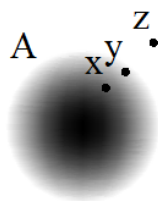
За класичну теорију скупова је карактеристично да су врло прецизне границе које раздвајају елементе неког скупа од оних које то нису, тј. припадност неког елемента класичном (*crisp*) скупу јасно је одређена: или припада или не припада. За класичан скуп  $\underline{A}$  је припадање неког елемента  $x$  одређено функцијом припадности  $\mu_{\underline{A}}(x)$  која узима вредност 1 ако и само ако је елемент  $x$  у скупу  $\underline{A}$  или вредност 0 у супротном. Ово је приказано на Сл. П1. 0.2, одакле се види да је  $\mu_{\underline{A}}(x)=1$  и  $\mu_{\underline{A}}(y)=0$ .



Сл. П1. 0.2 Скуп  $\underline{A}$  и елементи  $x$  и  $y$

С друге стране, велики број скупова којима се располаже у реалности нема прецизно одређене границе, тј. оне су „размрљане“. Пример за то су квалитативни описи типа „уређај није стар ако има око 30 година“, где се прибегава субјективној процени којом се, услед недостатка јасно постављене границе,

сасвим оправдано и температура за неколико степени нижа или виша може окарактерисати као члан поменутог скупа, наравно, са мањим или већим степеном истинитости. Основна карактеристика фази скупа је његова функција припадности. Ако је са  $U$  означен универзалан скуп и са  $\mu_A(x)$  функција припадности, онда се фази скуп  $A$  може дефинисати као скуп уређених парова  $A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\}$ , при чему је  $\mu_A(x)$  степен припадности елемента  $x$  скупу  $A$ . Уколико је  $\mu_A(x)$  веће, толико има више истине у тврдњи да елемент  $x$  припада скупу  $A$ . За фази скупове опсег припадања је подскуп ненегативних природних реалних бројева чији је супремум коначан и најчешће се усваја да је тај скуп јединични интервал  $[0,1]$ . На Сл. П1. 0.3 је графички приказан фази скуп  $A$  са нејасним границама и његови елементи  $x$ ,  $y$  и  $z$ .



Сл. П1. 0.3 Фази скуп  $A$  и елементи  $x$ ,  $y$  и  $z$

Фази скупови могу бити дефинисани и преко своје подршке (support). Подршка је део класичног скупа за који важи да вредност његове функције припадности узимају вредност већу од нуле (Сл. П1. 0.4).

$$Supp(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (\text{П.1.1})$$

Са Сл. П.1.4. се може видети  $Supp(A) = (15,45]$ . Разлика између фази логике и вероватноће се може сагледати и у томе што сума степени припадности фази скупа не мора бити увек једнака 1, док сума вероватноће могућих исхода увек мора бити један. Празан фази скуп има празну подршку и свака његова функција припадности је једнака нули. За фази скуп који поседује само један елемент важи  $\mu_A(x)=1$ , и он се назива фази синглетон. Елемент фази скупа за који важи да је  $\mu_A(x)=0.5$  назива се тачка проласка (*crossover point*). Језгро фази (*kernel*) скупа састоји се од елемената чија је функција припадности један:

$$ker(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{П.1.2})$$

Висина (*height*) фази скупа  $A$  је супремум функције  $\mu_A(x)$  по целом скупу  $U$ :

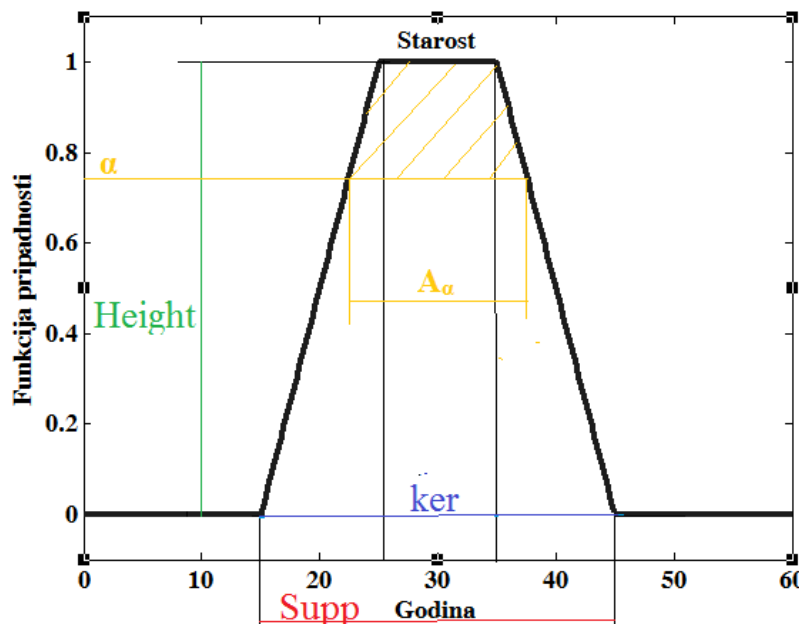
$$Height(A) = \sup \mu_A(x), x \in U \quad (\text{П.1.3})$$

Фази скуп је нормализован ако је његова висина једнака 1, иначе је субнормализован. Под  $\alpha$ -пресеком неког фази скупа **A** подразумева се класични скуп  $A_\alpha$  који се састоји од оних елемената чији је степен припадности фази скупу **A** већи или једнак  $\alpha$ , при чему је  $\alpha \in (0,1]$ . То се на други начин може написати као:

$$A_\alpha = \{x \in U | \mu_A(x) \geq \alpha\}, \alpha \in (0,1] \quad (\text{П.1.4})$$

Алфа пресек се назива и алфа ниво и помоћу њега се може објаснити принцип резолуције фази скупова. Принцип резолуције казује да се фази скуп може представити низом, унијом својих алфа пресека и да се може декомпоновати на низ фази скупова  $A_\alpha$ :

$$A = \bigcup_{\alpha} \alpha A_\alpha \rightarrow \int_0^1 \alpha A_\alpha \quad (\text{П.1.5})$$

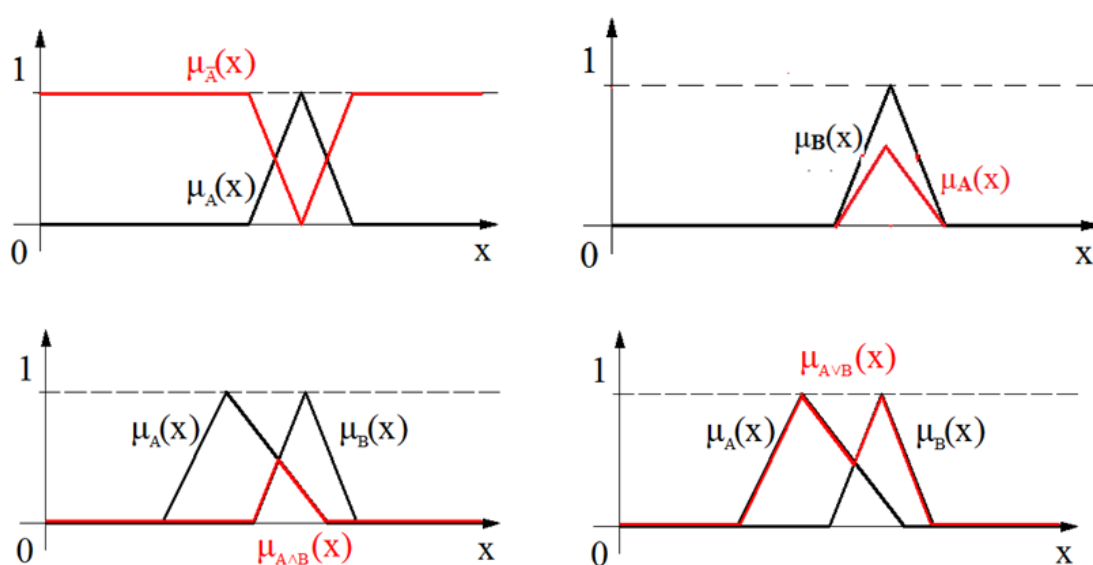


Сл. П1. 0.4 Фази скуп са назначеним терминима: *support*, *height*, *ker* и  $A_\alpha$

Два фази скупа **A** и **B** представљена су троугаоним функцијама припадности. За њих се могу дефинисати особине и операције као и код класичних скупова (Сл. П.1.5.). Под комплементом фази скупа **A** подразумева се фази скуп чија се функција припадности израчунава као:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{П.1.6})$$

Функције припадности произвољног фази скупа **A** и његовог комплемента приказане су на Сл. П1. 0.5. Фази скуп **A** је подскуп фази скупа **B** ако и само ако је испуњен услов  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  за све елементе  $x$  из скупа **X** над којим су фази скупови **A** и **B** дефинисани. Другим речима,  $A \subset B$  уколико је за свако  $x$  степен припадности фази скупу **A** мањи или једнак степену припадности фази скупа **B**, односно да је вредност функције припадности фази скупу **A** на целом скупу дефинисаности **X** мања или једнака вредности функције припадности фази скупа **B**.



Сл. П1. 0.5 Графички приказ особина класичних скупова који важе и за фази скупове

Пресек фази скупова **A** и **B** дефинише се као највећи фази скуп који је истовремено садржан у фази скуповима **A** и **B**. Пресек одговара логичкој операцији „и“. Функција припадности  $\mu_{A \cap B}(x)$  пресека  $A \cap B$  дефинише се на следећи начин:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (\text{П.1.7})$$

Унија фази скупова **A** и **B** означава се као  $A \cup B$  и дефинише се као највећи фази скуп који истовремено садржи и фази скуп **A** и фази скуп **B**. Функција припадности уније фази скупова **A** и **B** дефинише се на следећи начин:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) \quad (\text{П.1.8})$$



Унија одговара логичкој операцији „или“ и често се уместо симбола „max“ користи симбол „ $\vee$ “. За два фази скупа **A** и **B** дефинисана на скупу **X** може се рећи да су једнаки ако и само ако је  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$  за све елементе  $x$  скупа **X**. За фази скупове важе Де Морганови закони као и за класичне скупове. Кардиналност у теорији фази скупова се дефинише као сума степена припадности  $\mu_A(x)$ :

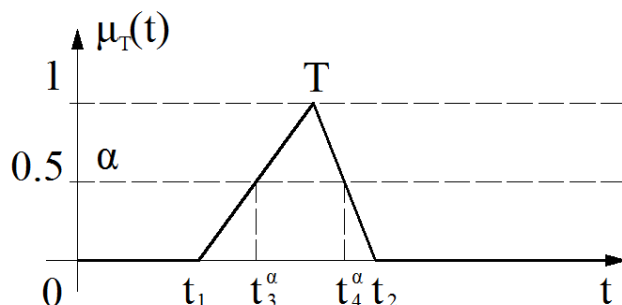
$$\text{card}_A = \mu_A(x_1) + \mu_A(x_2) + \dots + \mu_A(x_n) \quad (\text{П.1.9})$$

где је са  $n$  означен број елемената скупа **X** над којим је фази скуп **A** дефинисан. Фази скуп је нормализован ако је степен припадности бар једног његовог елемента једнак 1. Конвексан фази скуп задовољава следећу релацију:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \mu_A(x_1) \wedge \mu_A(x_2), \forall x_1, x_2 \in X; \forall \lambda \in [0,1] \quad (\text{П.1.10})$$

### Фази бројеви

Конвексан, нормализован фази скуп, дефинисан на реалној оси, чија је функција припадности део по део непрекидна, назива се фази број (*fuzzy number*). Фази број се може третирати као уопштење концепта интервала припадања, који је најчешће дефинисан преко своје доње и горње границе. Уколико се са  $T$  означи неки временски период, рецимо време отклањања квара, код којег постоји одређена неизвесност у трајању, а за који се ипак са сигурношћу може тврдити да не траје краће од  $t_1$  и не дуже од  $t_2$ , тада затворени интервал  $[t_1, t_2]$  представља интервал поверења и то се симболички означава као:  $T = [t_1, t_2]$ . Степен припадности се означава са  $\alpha$   $[0,1]$  и он за поменути интервал поверења  $[t_1, t_2]$  износи  $\alpha = \mu_T(t_1) = \mu_T(t_2) = 0$ . За неки други интервал поверења,  $[t_3, t_4]$ , где је  $t_1 < t_3 < t_4 < t_2$  степен припадности као на Сл. П1. 0.6 узима вредности  $\alpha = \mu_T(t_3) = \mu_T(t_4) = 0,5$ .



Сл. П1. 0.6 Фази број  $T$  и одговарајући интервал поверења за степен припадности  $\alpha=0,5$

Фази број  $T$  је фази скуп који у ствари поседује одређене особине. Свака вредност  $t_x$  из интервала поверења фази броја има своју неизвесност и поуздана је у зависности од функције припадности са вредношћу  $\mu_T(t_x)$ .

Смисао примене фази бројева у електроенергетици има код вредности променљивих за чију истинитост нисмо потпуно сигурни. Такве променљиве се представљају фази бројевима и јављају се у једначинама и моделима проблема. Да би се њима могло служити, потребно је дефинисати операције над њима. Фази бројеви се сабирају тако што се сабирају интервали поверења. За интервале поверења  $\mathbf{X}=[x_1, x_2]$ ,  $\mathbf{Y}=[y_1, y_2]$  збир два фази броја може симболично да се изрази на следећи начин:

$$\mathbf{X} (+) \mathbf{Y} = [x_1, x_2] (+) [y_1, y_2] = [x_1 + y_1, x_2 + y_2] \quad (\text{П.1.11})$$

С обзиром на то да сваком интервалу поверења код фази броја одговара одређена вредност степена припадности, приликом сабирања фази бројева врши се сабирање интервала поверења са истом вредношћу степена припадности, и то за сваку од тих вредности. Ако су са  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  означени фази бројеви, а са  $X_\alpha$  и  $Y_\alpha$  интервали поверења ових бројева којима одговара степен припадности  $\alpha$ , за сабирање важи:

$$X_\alpha + Y_\alpha = [x_1^\alpha, x_2^\alpha] (+) [y_1^\alpha, y_2^\alpha] = [x_1^\alpha + y_1^\alpha, x_2^\alpha + y_2^\alpha] \quad (\text{П.1.12})$$

Одузимање фази бројева се врши на исти начин на који се одузимају интервали поверења. За интервале поверења  $\mathbf{X}=[x_1, x_2]$ ,  $\mathbf{Y}=[y_1, y_2]$  разлика два фази броја може симболично да се изрази на следећи начин:

$$\mathbf{X} (-) \mathbf{Y} = [x_1, x_2] (-) [y_1, y_2] = [x_1 - y_2, x_2 - y_1] \quad (\text{П.1.13})$$

Код одузимања интервала поверења највећа вредност умањеоца се одузима од најмање вредности умањеника, а најмања вредност умањеоца од највеће вредности умањеника. Код одузимања фази бројева врши се одузимање интервала поверења са истом вредношћу степена припадности, и то за све вредности степена припадности. Ако су са  $X_\alpha$  и  $Y_\alpha$  означени интервали поверења којима одговара степен припадности  $\alpha$ , за одузимање важи:

$$X_\alpha - Y_\alpha = [x_1^\alpha, x_2^\alpha] (-) [y_1^\alpha, y_2^\alpha] = [x_1^\alpha - y_2^\alpha, x_2^\alpha - y_1^\alpha] \quad (\text{П.1.14})$$

За фази бројеве  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  у скупу  $\mathbf{R}^+$  и интервале  $X_\alpha$  и  $Y_\alpha$  за степен припадности  $\alpha$  производ се дефинише као:

$$X_\alpha \cdot Y_\alpha = [x_1^\alpha, x_2^\alpha] (\cdot) [y_1^\alpha, y_2^\alpha] = [x_1^\alpha y_1^\alpha, x_2^\alpha y_2^\alpha] \quad (\text{П.1.15})$$

За исте фази бројеве количник се дефинише као:

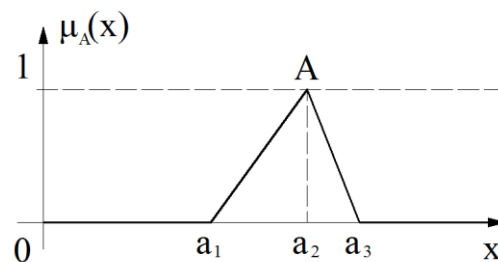
$$X_\alpha : Y_\alpha = [x_1^\alpha, x_2^\alpha] (\cdot) [y_1^\alpha, y_2^\alpha] = [x_1^\alpha / y_2^\alpha, x_2^\alpha / y_1^\alpha] \quad (\text{П.1.16})$$

За фази број  $X$  у скупу  $\mathbf{R}$  и константу  $c \in \mathbf{R}_0^+$  важи да је производ те константе и интервала поверења  $X_\alpha$  за степен припадности  $\alpha$  једнак:

$$cX_\alpha = [c, c] (\cdot) [x_1^\alpha, x_2^\alpha] = [cx_1^\alpha, cx_2^\alpha] \quad (\text{П.1.17})$$

У употреби код реалних проблема најчешће се појављује посебна класа фази бројева – троугласти и трапезоидни фази бројеви. Њихов назив је проистекао из облика функције припадности ових бројева. Најчешће се приказују у облику (Сл. П1. 0.7)  $A = (a_1, a_2, a_3)$ , где је:

- $a_1$  – доња (лева) граница троугластог фази броја  $A$ ,
- $a_2$  – вредност којој одговара највећи степен припадности и
- $a_3$  – горња (десна) граница троугластог фази броја  $A$ .



Сл. П1. 0.7 Функција припадности фази броја  $A$

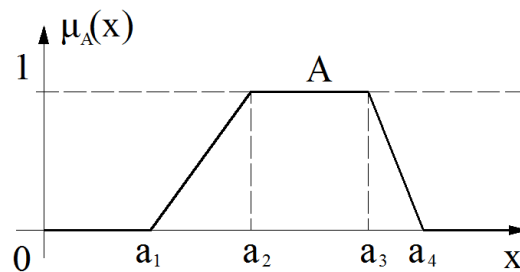
Функција припадности фази броја  $A$  гласи:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1), & a_1 \leq x \leq a_2 \\ (a_3 - x) / (a_3 - a_2), & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x \geq a_3 \end{cases} \quad (\text{П.1.18})$$

Супротни фази број броја  $A$  је  $A^- = (-a_3, -a_2, -a_1)$ . Ако су  $A(a_1, a_2, a_3)$ ,  $B(b_1, b_2, b_3)$ , и  $C(c_1, c_2, c_3)$  фази бројеви са својим интервалима, онда се основне аритметичке операције дефинишу као:

$$\begin{aligned} A + B &= (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \\ A - B &= (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3) \\ A \cdot B &= (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3) \\ A / B &= (a_1 / b_3, a_2 / b_2, a_3 / b_1) \end{aligned} \quad (\text{П.1.19})$$

Претходне релације у ствари служе за одређивање граница интервала који дефинишу функције припадања за суму, разлику, производ и количник фази бројева. На Сл. П1. 0.8. је приказан трапезоидни фази број  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ .



Сл. П1. 0.8 Функција припадности трапезоидалног фази броја  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$

Лако се показује да су збир и разлика трапезоидалних фази бројева  $A$  и  $B$ :

$$A (+) B = (a_1, a_2, a_3, a_4) (+) (b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4) \quad (\text{П.1.20})$$

$$A (-) B = (a_1, a_2, a_3, a_4) (-) (b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1) \quad (\text{П.1.21})$$

Код реализације операција сабирања, одузимања, множења и дељења над фази бројевима добијају се фази бројеви чије се функције припадности могу исказати релацијом:

$$\mu_C(z) = \mu_{A+(-,*,/)B} = \max \{ \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] \} \quad (\text{П.1.22})$$

Ове релације заправо представљају генерализацију релације сабирања, одузимања, множења и дељења за различите фази бројеве, тј. за њихове различите облике функције припадности. Из претходних дефиниција операција над фази бројевима и из последње релације може се закључити да се као резултат увек добија број који је максимално распрегнут .

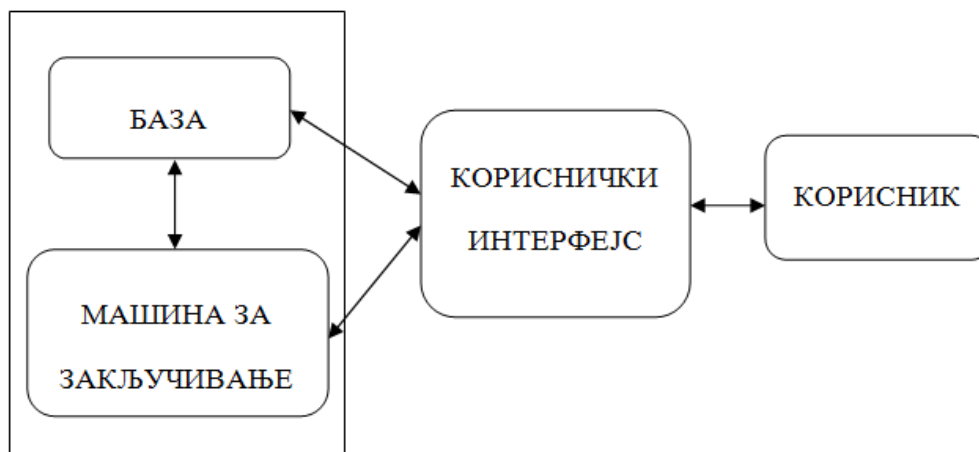
### Фази логика

Фази логика се односи на логички систем којим се генерализује класична бивалентна логика која располаже само два вредностима. Основна идеја за њено увођење лежи у чињеници да људско резонување може да располаже концептима и знањима која не морају бити егзактно дефинисана у интервалима са јасним границама. Често се меша појам фази логике, фази броја и скупа. Сама реч логика се односи на некакво логично закључивање, док фази треба да омогући

репрезентацију некакве неодређености у знању и примењеним правилима. Фази логика, за разлику од осталих логичких система, располаже и барата непрецизним и/или несигурним знањем. Професор Лотфи Задех је 1973. године објавио свој други најзначајнији рад из теорије фази скупова у којем је представио концепт новог приступа анализи сложених система – предложио је репрезентацију људског знања путем фази правила, тј. такозваних *if – then* правила, која су темељ на којем почива фази логика. Бинарна, бивалентна, логика познаје само два случаја: тачно и нетачно, без међунијанси, односно степена истинитости између ових двају екстрема. Другим речима, бинарна логика не признаје непрецизност у истини. Пошто се за постизање високих нивоа прецизности захтева доста уложеног времена и новца, одлуке се доносе прављењем равнотеже између тражене прецизности и постојеће несигурности. Што је посматрани систем компликованији, то су непрецизније информације којима се тај систем карактерише. Код већине проблема у инжењерској пракси се посао много боље и брже обавља уколико се прихвати одређени степен непрецизности. Једна од најчешћих примена фази логике је у моделовању сложених система код којих је веома тешко да се утврде међузависности које постоје између појединих променљивих. Два општа случаја, када има смисла користити фази логику, јесу: у ситуацијама које укључују врло компликоване системе, чије понашање се не разуме у потпуности, као и у ситуацијама где је пожељно донекле приближно, али брзо решење.

Фази експертски систем (Сл. П1. 0.9) јесте програм који се понаша као експерт за неке проблеме. Он има две основне функције. Прва је решавање проблема, односно способност коришћења знања у одређеном домену. За овакву функцију од експертског система се очекује да буде способан да се избори са посредним и некомплетним информацијама. Друга функција је интеракција са корисником, која укључује објашњење сврхе система и његових одлука током и након решавања проблема. Три основна блока сачињавају основну структуру експертског система: база знања, машина за закључивање и кориснички интерфејс. База знања компримује знање специфицирано у домену примене, укључујући такве ствари као што су чињенице везане за тај домен и правила која описују везе (релације) у домену. Код фази експертских система се

репрезентација знања врши преко фази правила, тј. *if – then* правила. Систем показује и како се дошло до одређеног закључка. Машина за закључивање активно користи расположиве информације из базе знања за резонување у сврху добијања одговора на корисничке упите. Кориснички интерфејс обезбеђује комуникацију између корисника и система, а такође обезбеђује кориснику увид у процес решавања проблема који врши машина за закључивање.



Сл. П1. 0.9 Шематски приказ екпертског система

Код фази логике важе све законитости као и код класичне бинарне логике. У њеној основи се налазе фази (*if – then*, тј. ако – онда) правила. Сва правила у неком систему закључивања базираном на фази логици чине базу правила или базу знања. Ова правила која се уносе у систем доношења одлука најчешће су базирана на претходном искуству. Функционални фази системи готово по правилу садрже више од једног лингвистичког правила у бази правила. Комбиновањем ових правила може да се изрази комплетна математичка репрезентација свеукупног знања експерта везаног за одговарајући проблем који је предмет обраде фази логиком. Помоћу листе *if – then* тврђења формира се база правила која „лингвистичко“ знање о проблему уноси у фази систем или фази контролер. Сва правила се извршавају паралелно и њихов редослед није битан. Оваква листа правила се назива база правила (*rule base*). Правила се односе на лингвистичке променљиве и на њихове особине. Сви фази системи решавање постављеног проблема врше у четири главна корака:

- фазификација улазних променљивих,
- процена правила (инференција, тј. закључивање),

- агрегација (композиција) свих излаза из правила и
- дефазификација.

Први корак јесте фазификација која напросто модификује сигнале улаза тако да могу бити правилно протумачени и упоређени са правилима у бази правила. Референтни сигнал се претвара у адекватан фази облик. На овај начин улазне и излазне променљиве се претварају у фази скупове. Фазификација се такође зове фази уклапање (*fuzzy matching*), којим се рачуна са којим степеном истинитости се улазни подаци поклапају са условима у фази правилима. Другим речима, испитује се њихова припадност лингвистичким вредностима дефинисаним фази скуповима. Ово омогућавају управо функције припадности, које у ствари мапирају степен истинитости неке тврдње. Функција припадности представља континуално мерило сигурности да ли је променљива класификована као та лингвистичка вредност.

Формирање базе правила подразумева постављање „ако – онда“ правила (*if – then*) којима се повезују улазне променљиве са излазним. Да би се изразила последица коју производе тренутне вредности улазних променљивих, формирају се правила. Ова правила имају облик:

*if <uslov> then <posledica>*,

с тим што је могуће имати више паралелних *if*-ова који се повезују везницима „*and*“, „*or*“ и „*not*“, тако да се помоћу њих могу градити сложена тврдјења. Ови везници се односе на операције пресека, уније и комплемента у класичној теорији скупова. *If – then* правила могу у себи садржати више услова у *if* делу, као и више последица у *then* делу повезаних. На тај начин могу да се саставе и компликованије изјаве. Могуће је повезати и више *if – then* правила употребом израза *else* („друго“, „осим“) да би се добио такозвани алгоритам за апроксимативно резонување. Такође, постоји и оператор негације који се може користити уз сваку од променљивих, улаза или излаза. Свако правило засебно може да добије свој тежински фактор (*weight*). Ако је он за сва правила исти и износи један, онда су сва правила равноправна.

Следећи корак је закључивање на основу процене правила, односно инференција. Постоје различити типови и њихове модификације закључивања у фази логици, али два типа закључивања која су најзаступљенија су *Mamdani* и

*Sugeno*. Овда два типа закључивања су основна и најбитнија. Код оба типа закључивања за неку унапред задату вредност улазне променљиве (која се добија мерењем, посматрањем или субјективном проценом) пролази се кроз сва дефинисана правила, тј. посматра се колико има истине у свакој појединачној тврдњи. Тако се одређује вредност јачине правила. Код закључивања се рачуна фази скуп из закључка фази правила у зависности од јачине одговарајућег правила. Постоје два општа приступа која се користе код *Mamdani* типа закључивања: метод одсецања и метод скалирања, док се код *Sugeno* типа закључивања излаз фази правила добија као функција улазних фази променљивих које у том правилу фигуришу. Оба метода, одсецање и скалирање, генеришу закључак кроз смањивање висине фази скупа који се додељује излазној променљивој у *then* делу фази правила. Мера смањења зависи од јачине правила: што је нижи степен истинитости код премисе (*if* дела правила), тиме је веће смањење висине фази скупа додељеног излазној променљивој. Дакле, ако вредност улазне променљиве са мањом вероватноћом спада под функцију припадности те променљиве, онда је висина тог фази скупа улазне променљиве мања. Наредни корак у фази систему закључивања представља агрегација. Због тога што се фази систем заснива на правилима која се делимично преклапају, одређене улазне вредности за систем могу да активирају и више правила одједном (више од једног правила ће имати јачину већу од нуле). Отуда је агрегација потребна да комбинује резултате инференције за свако активирано правило и оформи јединствени фази скуп за излазну променљиву. Агрегација узима све претходно исечене или скалиране излазне функције припадности и сједињава у једну излазну променљиву.

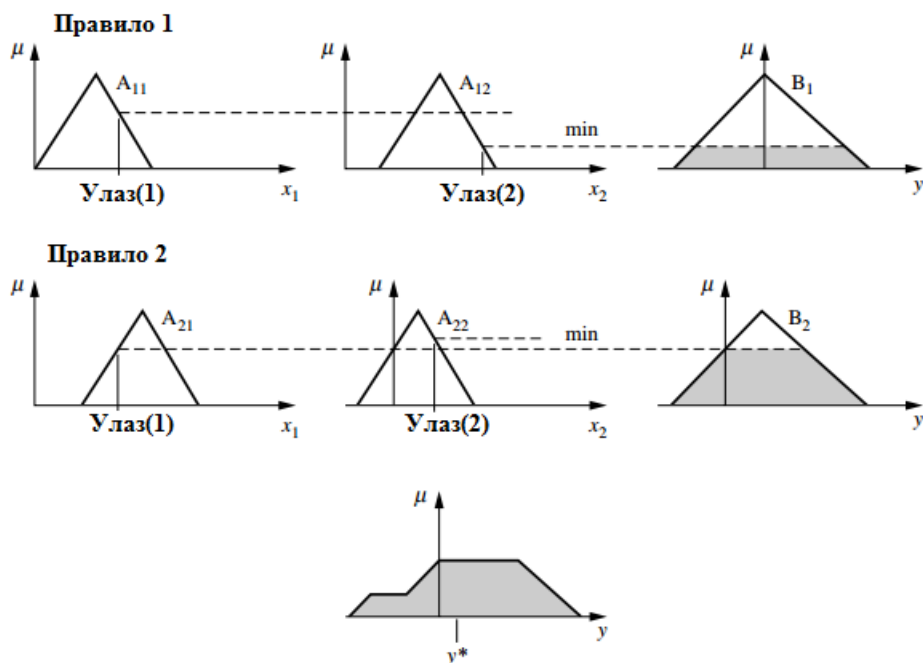
Најчешће коришћен систем фази закључивања је такозвани метод *Mamdani*. Оно што је кључно за *Mamdani* тип закључивања је да се као резултат агрегације очекује фази скуп. Постоји више различитих типова инференције од којих су за *Mamdani* систем закључивања најзначајније већ споменуте методе одсецања и скалирања, где се смањује висина излазног фази скупа. Метода одсецања се у литератури још назива и *Mamdani* правило минимума (*Mamdani* импликација), јер се узима минимална висина од свих улаза за релевантну висину одсецања излазне функције припадности. На Сл. П1. 0.10, која је преузета из [71],



приказана је илустрација *Mamdani* система закључивања, где је за инференцију одабрана метода одсецања, а *if – then* правила гласе:

*If* ( $x_1 = A_{11}$ ) *and* ( $x_2 = A_{12}$ ) *Then* ( $y = B_1$ ) *Else*

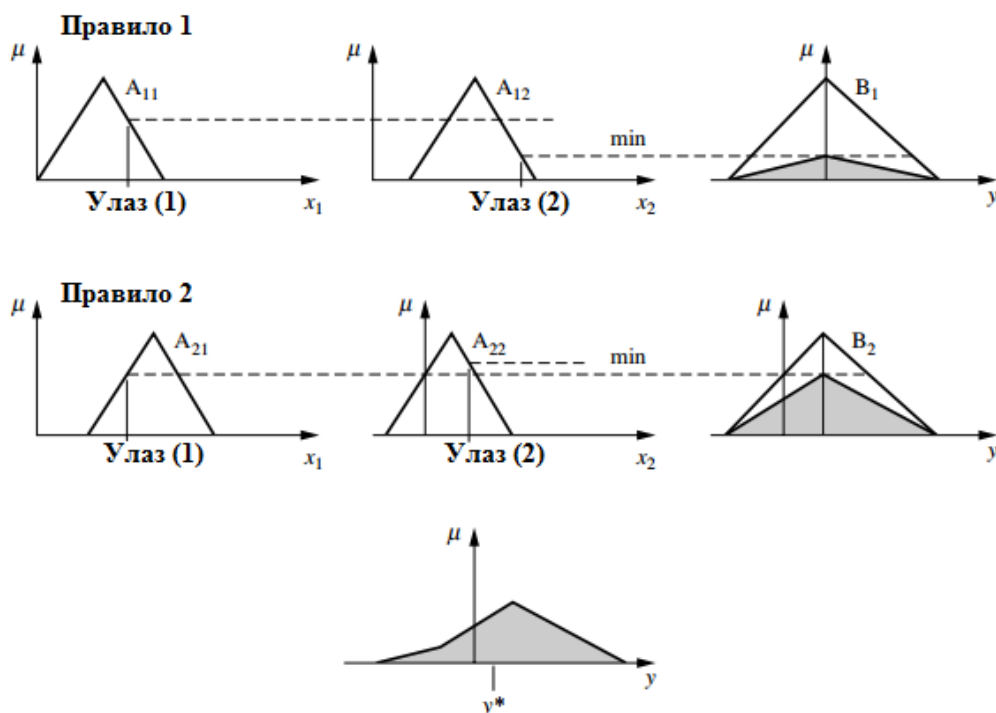
*If* ( $x_1 = A_{21}$ ) *and* ( $x_2 = A_{22}$ ) *Then* ( $y = B_2$ ).



Сл. П1. 0.10 Илустрација *Mamdani* система закључивања са методом одсецања

Метод одсецања исеца онај део врха излазне функције припадности, за који су вредности те функције веће од јачине правила, односно степена истинитости премисе. Због тога што се одсеца део врха функције припадности из *then* дела правила, одговарајући фази скуп губи део информације коју носи. Међутим, одсецање се ипак чешће примењује због тога што се лакше и брже врши прорачун који доводи до резултата агрегације, који су генерално лакши за дефазификацију. Метода скалирања се у литератури још назива и *Larsen*-ово правило производа [72] или *Mamdani* производ [71]. Функција припадности излаза се скалира према минималној висини. На Сл. П1. 0.11, преузетој из [71], приказана је илустрација *Mamdani* система закључивања, где је за инференцију одабрана метода скалирања, а *if – then* правила су иста као и за Сл. П1. 0.10. Методом скалирања се функција припадности смањује скалирањем до вредности одговарајуће јачине правила. Он је, с друге стране, бољи што се тиче очувања оригиналног облика фази скупа из *then* дела правила. Његова оригинална функција припадности се подешава на тај начин што се сваки степен припадности помножи са степеном истинитости

премисе фази правила, односно јачином правила. Ова метода, којом се губи мање информација, може да буде врло корисна у фази експертским системима.



Сл. П1. 0.11 Илустрација *Mamdani* система закључивања са методом скалирања

Излаз *Mamdani* система закључивања је у форми фази броја, па је потребно извршити дефазификацију резултата. То је уједно и последњи корак у фази процесу закључивања. Као улаз за дефазификацију се користи фази скуп излазне променљиве који се добија као резултат агрегације.

Дефазификација трансформише резултате у такав облик сигнала да они могу бити сигнали који представљају излазе. Дефазификација представља, у суштини, процес супротан процесу фазификације, па се назива и декодирање. Методе које се најчешће користе за дефазификацију су:

- метода тежишне тачке, центар гравитације (*centroid / center of gravity – COG / center of area – COA*),
- најмањи максимум (*smallest of maximum – SOM*),
- средњи максимум (*mean of maximum – MOM*),
- највећи максимум (*largest of maximum – LOM*) и
- метода једнаких површина (*bisector*).

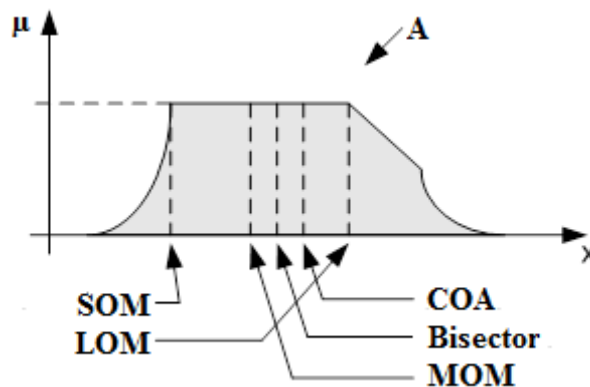
Најчешће коришћене методе за дефазификацију су одабир вредности са највећим степеном припадности (*MOM*) или вредности која представља гравитациони

центар масе (ЦОА). MOM – као решење проблема моделованог фази логиком даје бројну вредност која представља средњу вредност свих оних вредности за које је функција припадности излазне променљиве достигла свој максимум. Уколико постоји максимум у само једној тачки, тада SOM, MOM и LOM методе дефазификације враћају исту вредност. COA – као решење проблема моделованог фази логиком даје бројну вредност која представља центар гравитације површи описане функцијом припадности излазне променљиве. *Bisector* – као решење налази тачку кроз коју би провлачењем вертикалне линије поделили површину описану функцијом припадности агрегисаног фази скупа на два дела једнаких површина. Графички приказ метода дефазификације је приказана на Сл. П1. 0.12. Формула у континуалном домену за најчешће примењивану методу дефазификације COA је:

$$A = defuzzy(A) = \frac{\int \mu_A(x) \cdot x \cdot dx}{\int \mu_A(x) \cdot dx} \quad (\text{П.1.23})$$

За дискретни случај се примењује формула:

$$A = defuzzy(A) = \frac{\sum_i \mu_A(x_i) \cdot x_i}{\sum_i \mu_A(x_i)} \quad (\text{П.1.24})$$



Сл. П1. 0.12 Илустрација метода дефазификације

*Sugeno* систем закључивања – Јапанац, доктор Мичио Суџено (*Sugeno*), предложио је 1985. године систем закључивања који је доста сличан *Mamdani* типу. За овај систем су (у литератури познат и као *Takagi-Sugeno-Kang*) прва два корака, фазификација и инференција (примена фази оператора), потпуно иста као код *Mamdani* система. Главна разлика између ова два система лежи у начину

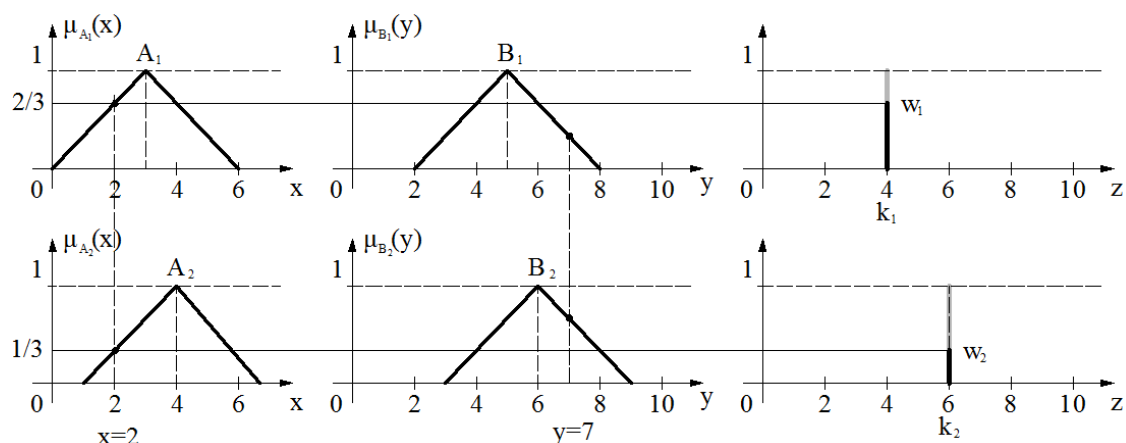
представљања излазних фази скупова из фази правила. За разлику од *Mamdani* система закључивања, овде је излаз функција у зависности од улазних вредности фази променљивих. Дефазификација, која је потребна код *Mamdani* типа закључивања, генерално гледано, захтевна је за калкулацију. Стога је доктор Суцено предложио да се за излаз код фази правила користе посебни фази скупови чија је функција припадности у облику клина и које имају вредност јединице само за једну одређену вредност, а вредност нуле за остатак области на којој су дефинисане. Додатно, овакав излаз је функција вредности улазних променљивих. Овај начин представљања излаза из *if – then* правила се може сматрати својеврсном „преддефазификацијом“. Општи облик једног *if – then* правила употребљеног у *Sugeno* систему закључивања је:

$$\text{If } (x = A) \text{ and } (y = B) \text{ Then } z = f(x, y).$$

Функција  $f(x, y)$  је облика  $f = ax + by + c$ , где су  $a$ ,  $b$  и  $c$  константне. Најчешће се користи *Sugeno* модел „нултог-реда“ – функција  $f$  има облик константе ( $a = b = 0$ ). Дефазификација је, као што је већ речено, знатно једноставнија и из методе центра гравитације се прелази у метод средње вредности са тежинским коефицијентима – *weighted average*. Процес инференције за *Sugeno* систем закључивања је графички приказан на Сл. П1. 0.13 за задата фази правила:

$$\text{If } (x \text{ is } A_1) \text{ or } (y \text{ is } B_1) \text{ Then } (z \text{ is } k_1) \text{ и}$$

$$\text{If } (x \text{ is } A_2) \text{ and } (y \text{ is } B_2) \text{ Then } (z \text{ is } k_2).$$



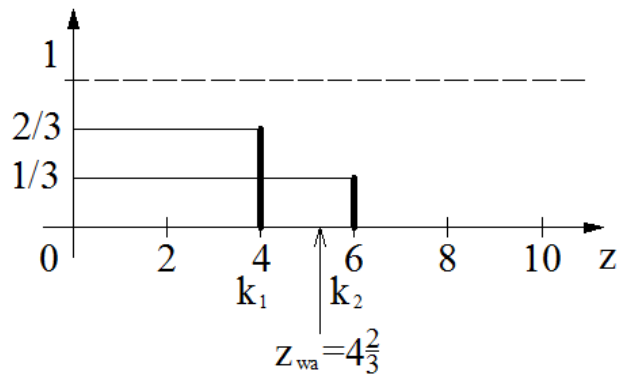
Сл. П1. 0.13 Илустрација процеса инференције за *Sugeno* систем закључивања

Након извршене агрегације као излаз се добија функција припадности у облику два клина приказана на Сл. П1. 0.14. Коришћењем *weighted average* методе за дефазификацију крајњег резултата добија се:

$$z_{WA} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{4 \cdot \frac{2}{3} + 6 \cdot \frac{1}{3}}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3}} = 4 \frac{2}{3} \quad (\text{П.1.24})$$

при чему  $k_i$  представља вредност у којој се налази клин,  $w_i$  висину тог клина, односно јачину тог фази правила, а  $n$  број клинова.

Код избора између *Mamdani* или *Sugeno* система закључивања узима се у обзир шта је сврха оваквог система. *Mamdani* систем је широко распрострањен у проблемима где је потребно представити експертско знање и то на начин који је интуитивно јасан. Међутим, *Mamdani* систем је спор за извођење. *Sugeno* систем је, с друге стране, бржи за извођење прорачуна и добро се понаша у проблемима оптимизације.



Сл. П1. 0.14 Излазно решење пре дефазификације (резултат агрегације) са означеним вредностима које се добијају као њен резултат

## Прилог 2 – Табеле база правила

Таб. П. 0.1 База правила за експертски подсистем електричних особина намотаја ЕТ

1. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Dobro) and (IP is Dobro) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Zadovoljavajuce) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Sumnjivo) and (IP is Zadovoljava) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Zadovoljava) (1)
3. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Sumnjivo) and (IP is Sumnjivo) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
4. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Sumnjivo) and (IP is Lose) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Opasno) (1)
5. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Opasno) and (IP is Opasno) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Opasno) then (Izlaz is Loše) (1)
6. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is not Dobro) and (IP is Opasno) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is not Zadovoljavajuce) then (Izlaz is Opasno) (1)
7. If ( $\text{tg}\delta_{\text{nam}}$ is Opasno) and (IP is Opasno) and ( $dR_{\text{Cu}}$ is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)

Таб. П. 0.2 База правила за експертски подсистем електричних особина проводних изолатора ЕТ-а

1. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is Dobro) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is Sumnjivo) and (IP is Zadovoljava) then (Izlaz is Zadovoljava) (1)
3. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is Sumnjivo) and (IP is Sumnjivo) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
4. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is Sumnjivo) and (IP is Lose) then (Izlaz is Loše) (1)
5. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is Opasno) and (IP is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
6. If ( $\max(\text{tg}\delta_{\text{pi}})$ is not Dobro) and (IP is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)

Таб. П. 0.3 База правила за експертски подсистем механичких особина намотаја ЕТ

1. If (ASLE is Dobro) and (CC is Dobro) and (DABS is Dobro) and (L $\gamma$ is Dobro) and (Io is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If (ASLE is Dobro) and (CC is Dobro) and (DABS is Dobro) and (L $\gamma$ is Zadovoljavajuce) and (Io is Dobro) then (Izlaz is Zadovoljavajuce) (1)
3. If (ASLE is Sumnjivo) and (CC is Sumnjivo) and (DABS is Sumnjivo) and (L $\gamma$ is Sumnjivo) and (Io is Opasno) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
4. If (ASLE is Opasno) and (CC is Opasno) and (DABS is Opasno) and (L $\gamma$ is Opasno) and (Io is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
5. If (ASLE is Opasno) and (CC is Opasno) and (DABS is Opasno) and (L $\gamma$ is Sumnjivo) and (Io is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
6. If (ASLE is Opasno) and (CC is not Dobro) and (DABS is not Dobro) and (L $\gamma$ is not Dobro) and (Io is not Dobro) then (Izlaz is Opasno) (1)
7. If (ASLE is Sumnjivo) and (CC is not Dobro) and (DABS is not Dobro) and (L $\gamma$ is Sumnjivo) and (Io is not Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
8. If (ASLE is Sumnjivo) and (CC is Dobro) and (DABS is Dobro) and (L $\gamma$ is Sumnjivo) and (Io is not Dobro) then (Izlaz is Zadovoljavajuce) (1)

Таб. П. 0.4 База правила за експертски подсистем за хемијске и електричне особине ЕСИ ЕТ-а

1. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) and (C <sub>p</sub> is 1) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Dobro) then (Izlaz is 1) (1)
2. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) then (Izlaz is 1) (1)
3. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) and (C <sub>p</sub> is 2) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Dobro) then (Izlaz is 2) (1)
4. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) then (Izlaz is 2) (1)
5. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) then (Izlaz is 3) (1)
6. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 1) and (C <sub>p</sub> is 4) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Sumnjivo) then (Izlaz is 4) (1)
7. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 1) then (Izlaz is 4) (1)
8. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) then (Izlaz is 4) (1)
9. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) then (Izlaz is 4) (1)
10. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 1) then (Izlaz is 4) (1)
11. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) and (C <sub>p</sub> is 5) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Sumnjivo) then (Izlaz is 5) (1)
12. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) then (Izlaz is 5) (1)
13. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 1) and (C <sub>p</sub> is 5) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Opasno) then (Izlaz is 6) (1)
14. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) then (Izlaz is 7) (1)
15. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) and (C <sub>p</sub> is 7) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Opasno) then (Izlaz is 7) (1)
16. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) then (Izlaz is 7) (1)
17. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 1) and (C <sub>p</sub> is 7) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Opasno) then (Izlaz is 8) (1)
18. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) then (Izlaz is 9) (1)
19. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 2) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 0) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 2) and (C <sub>p</sub> is 8) then (Izlaz is 9) (1)
20. If (CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> is 1) and (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> is 0) and (C <sub>p</sub> is 3) and (tgδ <sub>ulja</sub> is Dobro) then (Izlaz is 3) (1)



Таб. П. 0.5 База правила за експертски систем са *Mamdani* типом закључивања за ЕТ

1. If ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Opasno) and (T is T) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
2. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
3. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Dobro) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Dobro) and (T is T) and (IP is Lose) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
5. If ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Dobro) and (T is not T) and (IP is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
6. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
7. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
8. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Hitno) (1)
9. If ( $\theta$ is Visoka) then (Izlaz is Hitno) (1)
10. If (ASLE is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
11. If (ASLE is Opasno) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
12. If (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
13. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
14. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
15. If ( $\theta$ is Srednja) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
16. If ( $\theta$ is Srednja) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is 30dana) (1)
17. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is 30dana) (1)
18. If ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
19. If ( $\theta$ is Srednja) then (Izlaz is 60dana) (1)
20. If ( $\theta$ is Niska) and (IP is Opasno) then (Izlaz is Dobro) (1)
21. If ( $\theta$ is Niska) and (IP is Lose) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
22. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
23. If ( $\theta$ is Visoka) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
24. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
25. If (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
26. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
27. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)

Таб. П. 0.6 База правила за експертски систем са *Sugeno* типом закључивања нултог реда за ЕТ

1. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Opassno) and (T is T) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opassno) then (Izlaz is 9) (1)
2. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Opassno) and (T is T) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 8) (1)
3. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 7) (1)
4. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 6) (1)
5. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Opassno) and (T is T) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 5) (1)
6. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Opassno) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 4) (1)
7. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is not T) and (IP is Lose) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 3) (1)
8. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Dobro) and (T is not T) and (IP is Opassno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 2) (1)
9. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Dobro) and (T is not T) and (IP is Opassno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 1) (1)
10. If (CH4/H2 is 2) then (Izlaz is 9) (1)
11. If ( $\theta$ is Visoka) then (Izlaz is 8) (1)
12. If (ASLE is Opassno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opassno) then (Izlaz is 7) (1)
13. If (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opassno) then (Izlaz is 5) (1)
14. If ( $\theta$ is Visoka) and (T is T) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opassno) then (Izlaz is 6) (1)

Таб. П. 0.7 База правила за експертски систем са *Sugeno* типом закључивања за ET

1. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Opasno) and (T is T) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Hitno) (1)
2. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Opasno) and (T is T) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 30dana) (1)
3. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Sumnjivo) and (T is not T) and (IP is Lose) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Dobro) and (T is not T) and (IP is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
5. If (Vek is Razrada) and ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 0) and (ASLE is Dobro) and (T is not T) and (IP is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
6. If (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
7. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) then (Izlaz is Hitno) (1)
8. If (Vek is Razrada) and (CH4/H2 is 2) then (Izlaz is Hitno) (1)
9. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 2) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
10. If ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 1) and (ASLE is Sumnjivo) and (IP is Sumnjivo) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)

Таб. П. 0.8 База правила за експертски систем СМТ

1. If ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 2) and ( $\Delta i$ is Opasno) and ( $\Delta\phi$ is Opasno) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
2. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and ( $\Delta i$ is Sumnjivo) and ( $\Delta\phi$ is Sumnjivo) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
3. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 1) and ( $\Delta i$ is Dobro) and ( $\Delta\phi$ is Dobro) and (IP is Lose) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 0) and ( $\Delta i$ is Dobro) and ( $\Delta\phi$ is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
5. If ( $\theta$ is Niska) and (CH4/H2 is 0) and ( $\Delta i$ is Dobro) and ( $\Delta\phi$ is Dobro) and (IP is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
6. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 2) and ( $\Delta i$ is Sumnjivo) and ( $\Delta\phi$ is Sumnjivo) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
7. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Srednja) and (CH4/H2 is 2) and ( $\Delta i$ is Sumnjivo) and ( $\Delta\phi$ is Sumnjivo) and (IP is Dobro) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
8. If (Vek is Starost) and ( $\theta$ is Visoka) and (CH4/H2 is 0) and ( $\Delta i$ is Sumnjivo) and ( $\Delta\phi$ is Sumnjivo) and (IP is Lose) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Hitno) (1)
9. If ( $\theta$ is Visoka) then (Izlaz is Hitno) (1)
10. If ( $\Delta i$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
11. If ( $\Delta i$ is Opasno) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
12. If (CH4/H2 is 2) and ( $\Delta i$ is Opasno) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
13. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
14. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
15. If ( $\theta$ is Srednja) and ( $tg\delta_{nam}$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
16. If ( $\theta$ is Srednja) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is 30dana) (1)
17. If ( $\theta$ is Niska) and ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is 30dana) (1)
18. If ( $tg\delta_{nam}$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
19. If ( $\theta$ is Srednja) then (Izlaz is 60dana) (1)
20. If ( $\theta$ is Niska) and (IP is Opasno) then (Izlaz is Dobro) (1)
21. If ( $\theta$ is Niska) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
22. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Lose) then (Izlaz is 60dana) (1)
23. If ( $\theta$ is Visoka) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
24. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
25. If (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
26. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)
27. If ( $\theta$ is Srednja) and (IP is Zadovoljava) and ( $tg\delta_{nam}$ is Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)

Таб. П. 0.9 База правила за експертски подсистем за контакте прекидача

1. If (Vek is not Starost) and ( $\theta_{prethodna}$ is Niska) and ( $\theta$ is Niska) and (No is Mali) and ( $I_{\Sigma ks}$ is Mali) and ( $\Delta R_k$ is Malo) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If (Vek is Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Niska) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is not Veliki) and ( $I_{\Sigma ks}$ is not Veliki) and ( $\Delta R_k$ is Malo) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
3. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Srednja) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is not Mali) and ( $I_{\Sigma ks}$ is not Mali) and ( $\Delta R_k$ is not Malo) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_v$ is Visoka) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is Srednji) and ( $I_{\Sigma ks}$ is Srednji) and ( $\Delta R_k$ is Veliko) then (Izlaz is 30dana) (1)
5. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Visoka) and (No is Veliki) and ( $I_{\Sigma ks}$ is Veliki) and ( $\Delta R_k$ is Veliko) then (Izlaz is Hitno) (1)
6. If (Vek is Starost) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Visoka) then (Izlaz is Hitno) (1)
7. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is Veliki) and ( $I_{\Sigma ks}$ is Veliki) and ( $\Delta R_k$ is Malo) then (Izlaz is 30dana) (1)

Таб. П. 0.10 База правила за експертски подсистем за комору и медијум гашења електричног лука код прекидача

1. If ( $\theta_{SF6}$ is Dobra) and ( $\Delta p$ is Dobro) and ( $p$ is Dobro) and ( $\rho$ is Dobra) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If ( $\theta_{SF6}$ is Dobra) and ( $\Delta p$ is Sumnjivo) and ( $p$ is Dobro) and ( $\rho$ is Dobra) then (Izlaz is Zadovoljavajuce) (1)
3. If ( $\theta_{SF6}$ is not Dobra) and ( $\Delta p$ is Sumnjivo) and ( $p$ is not Dobro) and ( $\rho$ is not Dobra) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
4. If ( $\theta_{SF6}$ is not Dobra) and ( $\Delta p$ is Opasno) and ( $p$ is not Dobro) and ( $\rho$ is Dobra) then (Izlaz is Lose) (1)
5. If ( $\theta_{SF6}$ is not Dobra) and ( $\Delta p$ is Opasno) and ( $p$ is Dobro) and ( $\rho$ is not Dobra) then (Izlaz is Lose) (1)
6. If ( $\theta_{SF6}$ is Dobra) and ( $\Delta p$ is Opasno) and ( $p$ is not Dobro) and ( $\rho$ is not Dobra) then (Izlaz is Lose) (1)
7. If ( $\theta_{SF6}$ is not Dobra) and ( $\Delta p$ is Opasno) and ( $p$ is not Dobro) and ( $\rho$ is not Dobra) then (Izlaz is Opasno) (1)

Таб. П. 0.11 База правила за експертски подсистем за погонски механизам прекидача

1. If ( $V_k$ is Dobro) and ( $d_k$ is Dobro) and ( $\Delta t$ is Dobro) and ( $t_r$ is Dobro) and ( $t_m$ is Dobro) and ( $t_o$ is Dobro) and ( $\Delta t_{ON}$ is Dobro) and ( $\Delta t_{OFF}$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If ( $V_k$ is not Dobro) or ( $d_k$ is not Dobro) or ( $\Delta t$ is not Dobro) or ( $t_r$ is not Dobro) or ( $t_m$ is not Dobro) or ( $t_o$ is not Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
3. If ( $V_k$ is not Dobro) and ( $d_k$ is not Dobro) and ( $t_r$ is not Dobro) and ( $t_m$ is not Dobro) and ( $t_o$ is not Dobro) and ( $\Delta t_{ON}$ is Opasno) and ( $\Delta t_{OFF}$ is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
4. If ( $V_k$ is not Dobro) or ( $d_k$ is not Dobro) or ( $\Delta t$ is Opasno) or ( $t_r$ is not Dobro) or ( $t_m$ is not Dobro) or ( $t_o$ is not Dobro) or ( $\Delta t_{ON}$ is not Dobro) or ( $\Delta t_{OFF}$ is not Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
5. If ( $V_k$ is Prebrzo) or ( $d_k$ is Predugacko) or ( $\Delta t$ is Opasno) or ( $t_r$ is Presporo) or ( $t_m$ is Presporo) or ( $t_o$ is Presporo) or ( $\Delta t_{ON}$ is Opasno) or ( $\Delta t_{OFF}$ is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
6. If ( $V_k$ is Presporo) or ( $d_k$ is Prekratko) or ( $\Delta t$ is Opasno) or ( $t_r$ is Prebrzo) or ( $t_m$ is Prebrzo) or ( $t_o$ is Prebrzo) or ( $\Delta t_{ON}$ is Opasno) or ( $\Delta t_{OFF}$ is Opasno) then (Izlaz is Opasno) (1)
7. If ( $V_k$ is Presporo) or ( $d_k$ is Prekratko) or ( $\Delta t$ is Dobro) or ( $t_r$ is Prebrzo) or ( $t_m$ is Prebrzo) or ( $t_o$ is Prebrzo) or ( $\Delta t_{ON}$ is Dobro) or ( $\Delta t_{OFF}$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
8. If ( $V_k$ is Prebrzo) or ( $d_k$ is Predugacko) or ( $\Delta t$ is Dobro) or ( $t_r$ is Presporo) or ( $t_m$ is Presporo) or ( $t_o$ is Presporo) or ( $\Delta t_{ON}$ is Dobro) or ( $\Delta t_{OFF}$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)

Таб. П. 0.12 База правила за експертски подсистем за контакте растављача

1. If (Vek is not Starost) and ( $\theta_{prethodna}$ is Niska) and ( $\theta$ is Niska) and (No is Mali) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If (Vek is Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Niska) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is not Veliki) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
3. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Srednja) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is not Mali) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is Srednji) then (Izlaz is 30dana) (1)
5. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Visoka) and (No is Veliki) then (Izlaz is Hitno) (1)
6. If (Vek is Starost) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Visoka) then (Izlaz is Hitno) (1)
7. If (Vek is not Razrada) and ( $\theta_{prethodna}$ is Visoka) and ( $\theta$ is Srednja) and (No is Veliki) then (Izlaz is 30dana) (1)

Таб. П. 0.13 База правила за експертски подсистем за покретне делове растављача

1. If ( $\alpha$ is Dobro) and ( $\Delta I$ is Dobro) then (Izlaz is Dobro) (1)
2. If ( $\alpha$ is Dobro) and ( $\Delta I$ is not Dobro) and ( $\Delta T$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
3. If ( $\alpha$ is Sumnjivo) and ( $\Delta I$ is Sumnjivo) and ( $\Delta T$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 60dana) (1)
4. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is not Opasno) and ( $\Delta T$ is Opasno) then (Izlaz is 30dana) (1)
5. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is Opasno) and ( $\Delta T$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
6. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
7. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is Sumnjivo) then (Izlaz is 30dana) (1)
8. If ( $\alpha$ is Dobro) and ( $\Delta I$ is Dobro) and ( $\Delta T$ is not Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
9. If ( $\alpha$ is not Dobro) and ( $\Delta I$ is Dobro) and ( $\Delta T$ is Dobro) then (Izlaz is Sumnjivo) (1)
10. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is Opasno) and ( $\Delta T$ is not Opasno) then (Izlaz is 30dana)(1)
11. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is not Dobro) and ( $\Delta T$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
12. If ( $\alpha$ is not Dobro) and ( $\Delta I$ is Opasno) and ( $\Delta T$ is Opasno) then (Izlaz is Hitno) (1)
13. If ( $\alpha$ is Opasno) and ( $\Delta I$ is Opasno) and ( $\Delta T$ is not Dobro) then (Izlaz is Hitno) (1)

## БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О АУТОРУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Милета Д. Жарковић рођен је 27.7.1987. године у Крушевцу. Основну школу завршио је у Александровцу. Потом је похађао Математичку гимназију у склопу Гимназије из Крушевца, коју је успешно завршио као носилац дипломе „Вук Стефановић Караџић“. Учествовао је на такмичењима из физике и математике, а од награда посебно се издвајају трећа награда на Републичком и Савезном такмичењу из физике у трећој години средње школе. На основу тих диплома уписао је Електротехнички факултет у Београду 2006. године без полагања пријемног испита. На Електротехничком факултету изабрао је Одсек за енергетику, а затим и Смер за електроенергетске системе, где је сваке године проглашен за најбољег студента. Дана 2.7.2010. године завршио је основне академске студије на студијском програму Основне академске студије Електротехника и рачунарство, модул Енергетика – Смер електроенергетски системи, у трајању од четири године, обима 240 ЕСПБ бодова, са просечном оценом 9,46. Током четврте године студија постао је стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије. Урадио је тромесечну праксу у Јавном предузећу „Електромрежа Србије“, Погон преноса Београд, Служба експлоатације и служба заштите.

Мастер студије на Електротехничком факултету, Смер за електроенергетске системе, уписао је 2010. године. У току мастер студија остварио је просечну оцену 10,00. Мастер студије је завршио 2.11.2011. године, са оценом 10, на одбрани мастер рада на тему „Аутоматизација термовизијског поступка за мониторинг и дијагностику елемената преносне мреже Србије“. Ментор на изради мастер рада је био проф. др Златан Стојковић.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је школске 2012/2013. године на модулу Електроенергетске мреже и системи. Тренутно је студент докторских студија.

Од 10.10.2011. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду као сарадник у настави а затим и као асистент. На Основним и Мастер студијама је ангажован у извођењу наставе из предмета Високонапонска опрема, Општа енергетика, Практикум из софтверских алата у



електроенергетици, Пројектовање помоћу рачунара у електроенергетици, Техника високог напона 1, Техника високог напона 2, Кабловска техника, Електране, Елементи електроенергетског система, Мониторинг и дијагностика високонапонских постројења, као и лабораторијских вежби из предмета Електрична мерења 1, Електрична мерења 2, Техника високог напона 2 и Практикума – Лабораторијске вежбе из електроенергетских система. Од 2012. године обавља функцију потпредседника Спортског друштва „Електричар“. Од 2014. године обавља функцију секретара STK C4 CIGRE Србија. Од 2015. године обавља функцију секретара Катедре за електроенергетске системе.

Учествовао је у изради две студије и два пројекта чији је реализатор Електротехнички факултет у Београду. Аутор је седам радова у научним часописима међународног значаја са SCI листе, од тога један категорије M21, три категорије M22 и три категорије M23. Аутор је пет радова у зборницима међународних и регионалних научних скупова, као и седамнаест радова у зборницима скупова националног значаја.

Активно се служи енглеским језиком.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани: Милета Д. Жарковић

Број уписа: 5012/2012

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### **Мониторинг и дијагностика разводног постројења на бази фази модела стања високонпонске опреме**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 10.11.2017.

---

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: Милета Д. Жарковић

Број уписа: 5012/2012

Студијски програм: Електротехника и рачунарство

Наслов рада: Мониторинг и дијагностика разводног постројења на бази фази  
модела стања високонапонске опреме

Ментор: др Златан Стојковић, редовни професор

Потписани: Милета Д. Жарковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској  
верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума  
Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања  
доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране  
рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне  
библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у  
Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 10.11.2017.

\_\_\_\_\_

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **Мониторинг и дијагностика разводног постројења на бази фази модела стања високонапонске опреме**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

Потпис докторанда

У Београду, 10.11.2017.

---

---