



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Горан Ј. Добрић

МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА
СТАЊА МЕТАЛОКСИДНИХ
ОДВОДНИКА ПРЕНАПОНА НА БАЗИ
АНАЛИЗЕ СТРУЈЕ ОДВОЂЕЊА ПРИ
РАДНОМ НАПОНУ МРЕЖЕ

-докторска дисертација-

Београд, 2016.



UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Goran J. Dobrić

**MONITORING AND DIAGNOSTICS
OF METAL-OXIDE SURGE
ARRESTERS BASED ON THE
ANALYSIS OF LEAKAGE CURRENT
UNDER CONTINUOUS OPERATING
VOLTAGE**

-Doctoral Dissertation-

Belgrade, 2016

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 Зоран Стојановић, доцент
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Др Жарко Јанда, научни сарадник
(Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла“)

Др Жељко Ђуровић, редовни професор
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији
(Универзитет у Београду, Електротехнички факултет)

Датум усмене одбране: _____

МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА СТАЊА МЕТАЛОКСИДНИХ ОДВОДНИКА ПРЕНАПОНА НА БАЗИ АНАЛИЗЕ СТРУЈЕ ОДВОЂЕЊА ПРИ РАДНОМ НАПОНУ МРЕЖЕ

Резиме

Сигурно и поуздано снабдевање електричном енергијом је један од основних захтева који се од стране потрошача поставља пред електроенергетски систем (ЕЕС). Током свог рада, ЕЕС је свакодневно изложен ризицима од испада који могу проузроковати прекид напајања потрошача и хаварију скупе електроенергетске опреме. Металоксидни одводници пренапона (МОП), као заштитни уређаји, имају важну улогу у спречавању оваквих хаваријских ситуација, а самим тим и у очувању поузданости ЕЕС-а. Током животног века, електричне карактеристике МОП-а се неповратно мењају услед великог броја фактора, као што су: неправилан избор МОП-а, старење МОП-а узроковано радним напонам мреже, убрзано старење узроковано струјним напрезањима, продор влаге у кућиште МОП-а, утицај атмосферских прилика и др. Ове промене могу довести до отказа самог одводника пренапона који у том случају губи своја заштитна својства. Због важности самих одводника пренапона, као и великог броја утицајних фактора, мониторинг и дијагностика стања МОП-а представљају веома актуелну тематику која је обрађена у великом броју научно-истраживачких радова. До сада је развијен велики број метода за мониторинг и дијагностику стања МОП-а које су базиране како на мерењима у погону (*on-line* методе), тако и на мерењима ван погона (*off-line* методе) која укључују и мерења у лабораторији. Највише примењиване методе за процену стања МОП-а су методе базиране на анализи струје одвођења која се јавља услед деловања трајног радног напона. Иако се методе базиране на анализи струје одвођења при радном напону мреже широко примењују, поред својих предности, свака од ових метода има и одређене мане. Недостаци појединих метода се јављају у случају присуства виших хармоника у радном напону, услед варирања амплитуде радног напона, услед појаве грешака приликом мерења величина потребних за реализацију метода и сл.

У оквиру ове докторске дисертације дат је преглед метода за мониторинг и дијагностику стања МОП-а и извршена је анализа метода базираних на мерењу

струје одвођења. Такође је развијена и нова метода за мониторинг и дијагностику МОП-а којом се омогућава превазилажење одређених недостатака постојећих метода. Новоразвијеном методом, која се базира на примени генетског алгоритама, могу се сигурније и поузданије одредити релевантни параметри на основу којих је могуће проценити стање МОП-а. Поред тога, предложени су и нови показатељи који до сада нису били коришћени за дијагностику стања МОП-а.

У циљу математичке представе зависности радног напона и струје одвођења МОП-а, развијен је већи број еквивалентних модела одводника. Без обзира на то који од развијених модела се користи, параметри еквивалентних модела у сваком случају осликавају заштитне карактеристике реалних одводника пренапона, тј. директно утичу на изглед волт-амперске карактеристике МОП-а. Основна претпоставка на којој се базира новоразвијена метода, јесте да се на основу реалних мерних података, снимљених на реалном одводнику пренапона, применом оптимизационих метода могу одредити параметри еквивалентне шеме тог одводника, а самим тим и његова волт-амперска карактеристика. Тако одређени параметри представљају одличне показатеље стања одводника пренапона. Друга битна претпоставка је да се предности оптимизационих алгоритама из домена вештачке интелигенције могу искористити за превазилажење одређених недостатака који настају услед појаве грешака приликом мерења величина потребних за реализацију постојећих метода.

У циљу анализе и провере постављених хипотеза, истраживања су спроведена коришћењем квантитативних метода базираних на рачунарским симулацијама и на лабораторијским експериментима. Применом рачунарских симулација, у програмском пакету MATLAB, извршена је анализа перформанси постојећих метода за одређивање стања одводника пренапона базираних на анализи струје одвођења. Рачунарске симулације су омогућиле испитивање понашања алгоритама у различитим експлоатационим условима, као и анализу осетљивости на бројне утицајне факторе. Нова метода за одређивање параметара еквивалентне шеме одводника пренапона, базирана на генетском алгоритму, јесте такође развијена у програмском пакету MATLAB. Рачунарским симулацијама је извршена компаративна анализа постојећих и новоразвијене методе. У циљу

верификације развијене методе, извршена су лабораторијска испитивања на реалном одводнику пренапона. На основу реалних мерних података, снимљених у лабораторијским условима, извршено је одређивање показатеља стања одводника применом како постојећих тако и новоразвијене методе. Сва лабораторијска испитивања су спроведена у Лабораторији за високи напон Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Резултати добијени у оквиру ове докторске дисертације су применљиви у привреди, у процесу мониторинга и дијагностике стања одводника пренапона у погону. Новоразвијени алгоритам је могуће једноставно имплементирати у виду микроконтролера који би се користио у оквиру уређаја за мониторинг и дијагностику стања МОП-а. Овакав уређај би представљао новину из ове области и свакако би допринео повећању квалитета уређаја који се тренутно могу наћи на тржишту.

Кључне речи: мониторинг и дијагностика МОП-а, струја одвођења, генетски алгоритам, волт-амперска карактеристика МОП-а.

Научна област: Техничке науке – Електротехника

Ужа научна област: Електроенергетски системи

УДК: 621.3

MONITORING AND DIAGNOSTICS OF METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS BASED ON THE ANALYSIS OF LEAKAGE CURRENT UNDER CONTINUOUS OPERATING VOLTAGE

Abstract

Safe and reliable supply of electrical energy is one of the main consumer demands set before electric power system (EPS). EPS daily exposure to the risks of failure can cause supply interruption and breakdown of expensive electric power equipment. Metal-oxide surge arresters (MOSAs), being used as protective devices, play an important role in preventing such emergency situations and thus in preserving the reliability of EPS. During their lifetime, electrical characteristics of MOSAs irreversibly change due a number of factors. These factors include wrong selection of MOSAs, MOSA aging caused by operating voltage, accelerated aging caused by current stresses, the penetration of moisture into the MOSA housing, the impact of weather conditions etc. All these changes can lead to MOSA failure, in which case it loses its protective properties. Because of the importance of the surge arresters, as well as a large number of aforementioned affecting factors, MOSA monitoring and diagnostics is a very important topic that has been addressed in a number of scientific research papers. So far, a large number of MOSA monitoring methods have been developed. These methods have been based either on the measurements in operation (on-line methods), or on the measurements in the laboratory (off-line methods). The most frequently applied methods for the assessment of MOSA condition are the ones based on the analysis of leakage current that occurs due to the continuous operating voltage. Each of these methods, even though widely used and with undeniable advantages, shows a certain number of flaws as well. These flaws occur in cases of voltage harmonics, variation of operating voltage, the occurrence of errors during relevant measurements, etc.

Within this thesis, a review of MOSA monitoring and diagnostics methods as well as the analysis of their performance has been presented. Additionally, the thesis presents a new monitoring method that enables overcoming certain flaws of the existing methods. The newly developed method, which is based on genetic algorithm, can be used to reliably determine the relevant parameters for the assessment of MOSA condition. Besides that, new indicators of MOSA condition are proposed.

In order to mathematically present the dependencies between the operating voltage and the leakage current, a larger number of equivalent MOSA models have been developed. Regardless of the model used, the parameters of equivalent models in any case reflect the protective characteristics of surge arresters, i.e. they directly influence the volt-ampere characteristics of the arresters. The main hypothesis of the thesis which the newly developed method is based on, states that optimization techniques can successfully determine the parameters of equivalent circuits of MOSA using realistic measurements of operating voltage and leakage current. These parameters are excellent indicators of the surge arrester's condition. An auxiliary hypothesis states that the benefits of artificial intelligence optimization algorithms can be used to overcome certain shortcomings caused by the occurrence of errors during the measurements required within the existing MOSA monitoring methods.

In order to analyse and verify the hypotheses, studies have been conducted using quantitative methods based on computer simulations and laboratory experiments. Using MATLAB programming language, computer simulations have been conducted in order to analyse the performance of existing MOSA monitoring methods based on the analysis of leakage current. The computer simulations made it possible to study the behaviour of algorithms in different operating conditions, as well as the analysis of sensitivity on a number of affecting factors. The newly proposed method for determining the parameters of equivalent MOSA model, based on Genetic Algorithm, has also been developed in MATLAB. Comparative analysis of the existing and the newly developed methods has been done. Additionally, laboratory tests have been carried out on a real surge arrester in order to validate the developed method. On the basis of the actual measurement data recorded in laboratory conditions, MOSA condition indicators have been determined using both the newly developed and the existing methods. All the laboratory tests have been conducted in the High Voltage Laboratory at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade.

The results obtained in this doctoral thesis are applicable in industry, in the process of MOSA monitoring and diagnostics. The newly developed algorithm can be easily implemented within a microcontroller to be used in devices for monitoring the MOSA condition. Such a device would be a novelty in this area and certainly would help increase the quality of the devices currently offered in the market.

Keywords: MOSA monitoring and diagnostics, leakage current, genetic algorithm, voltage-current characteristic.

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power systems

UDK: 621.3

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. МЕТАЛОКСИДНИ ОДВОДНИЦИ ПРЕНАПОНА	6
2.1. Уводна разматрања	6
2.2. Конструкција МОП-а	8
2.3. Волт-амперска карактеристика и карактеристичне величине МОП-а.....	13
2.4. Еквивалентне шеме МОП-а.....	18
2.5. Утицај температуре на волт-амперску карактеристику и деградацију МОП-а.....	24
3. МЕТОДЕ ЗА МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКУ МОП-А	33
3.1. Уводна разматрања	33
3.2. Метода хармонијске анализе.....	40
3.3. Метода директног читавања резистивне компоненте струје одвођења.....	42
3.4. Метода губитака активне снаге	43
3.5. Метода компензације капацитивне компоненте струје одвођења	44
3.6. Метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења	48
3.7. Метода основног хармоника резистивне компоненте струје одвођења.....	51
3.8. Итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје одвођења.....	53
4. МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А НА БАЗИ ГЕНЕТСКОГ АЛГОРИТМА	55
4.1. Уводна разматрања	55
4.2. Опис методе	57
4.3. Елиминација потребе за синхроним мерењем напона и струје одвођења.....	62
5. РАЧУНАРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ ЗА АНАЛИЗУ ПЕРФОРМАНСИ МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А	65
5.1. Уводна разматрања	65
5.2. Анализа тачности метода за мониторинг МОП-а	66
5.3. Анализа поузданости показатеља стања МОП-а.....	106
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А.....	126

6.1. Уводна разматрања	126
6.2. Мерења приликом флукуације напона напајања.....	128
6.3. Мерења при различитим вредностима садржаја виших хармоника у напону напајања	133
6.4. Мерења при различитим амбијенталним температурама	139
7. ЗАКЉУЧАК	146
ЛИТЕРАТУРА	150
ПРИЛОЗИ.....	159
Прилог 1 - Извођење везе између капацитивности МОП-а.....	160
Прилог 2 – Генетски алгоритам.....	162
Прилог 3 –Утицај 5. и 7. хармоника напона на грешке метода за мониторинг МОП-а	169
Прилог 4 –Утицај 5. и 7. хармоника напона на показатеље стања МОП-а.....	182
Прилог 5 – Подаци о експериментима.....	196

ЛИСТА СЛИКА

Сл. 2.2.1 Класе хидрофобности полимерних кућишта [34].....	9
Сл. 2.2.2 МОП са порцеланским кућиштем [35]	10
Сл. 2.2.3 МОП са полимерним кућиштем типа производње 2 [35]	10
Сл. 2.2.4 МОП са полимерним кућиштем типа производње 3 [35]	11
Сл. 2.2.5 ZnO варистори [32]	12
Сл. 2.2.6 Микроскопска структура ZnO варистора [32]	12
Сл. 2.3.1 Волт-амперска карактеристика ZnO одводника пренапона	15
Сл. 2.3.2 Зависност коефицијента нелинеарности α од напона	16
Сл. 2.3.3 Дефиниција карактеристичних величина МОП-а	17
Сл. 2.4.1 Динамички модел МОП-а IEEE радне групе [47].....	18
Сл. 2.4.2 <i>Pinceti-Giannettoni</i> динамички модел МОП-а [48]	19
Сл. 2.4.3 <i>Fernandez-Diaz</i> динамички модел МОП-а [49]	19
Сл. 2.4.4 Упрошћен модел МОП-а.....	20
Сл. 2.4.5 Проширен модел МОП-а [15]	21
Сл. 2.4.6 Таласни облици напона и струја упрошћеног модела МОП-а	22
Сл. 2.4.7 Волт-амперска карактеристика упрошћеног модела МОП-а	22
Сл. 2.4.8 Таласни облици напона и струја проширеног модела МОП-а	23
Сл. 2.4.9 Волт-амперска карактеристика проширеног модела МОП-а	23
Сл. 2.5.1 Температурна зависност струјно-напонске карактеристике у области малих струја.....	25
Сл. 2.5.2 Динамичка стабилност рада МОП-а	26
Сл. 2.5.3 Утицај напона на апсорпциону моћ МОП-а.....	27
Сл. 2.5.4 Утицај амбијенталне температуре на апсорпциону моћ МОП-а	28
Сл. 2.5.5 Утицај температуре на ниво деградације МОП-а.....	30
Сл. 2.5.6 Утицај ударне струје на ниво деградације МОП-а.....	31
Сл. 2.5.7 Утицај деградације МОП-а на додатно загревање	31
Сл. 3.1.1 Релативно повећање укупне струје одвођења у зависности од релативног повећања резистивне компоненте струје одвођења (симулације) [5]	37
Сл. 3.1.2 Волт-амперска карактеристика укупне струје, њене резистивне компоненте и 3. хармоника укупне струје [5]	38
Сл. 3.1.3 Могући опсег грешака анализе 3. хармоника укупне струје за различите амплитуде и фазне ставове 3. хармоника напона [5]	39

Сл. 3.5.1 Принципска шема уређаја за директно мерење резистивне компоненте струје одвођења	45
Сл. 3.6.1 Приказ мерења приликом директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења	49
Сл. 3.7.1 Итеративна процедура одређивања струје I_{rlm}	53
Сл. 4.2.1 Блок дијаграм предложеног алгоритма за мониторинг МОП-а	61
Сл. 4.2.2 Операције генетског алгоритма.....	62
Сл. 4.3.1 Блок дијаграм методе без синхроног мерења напона и струје	64
Сл. 4.3.2 Принцип уважавања фазне грешке	64
Сл. 5.2.1 Резистивна струја при различитим коефицијентима нелинеарности	69
Сл. 5.2.2 R^2 показатељ <i>POW</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	69
Сл. 5.2.3 R^2 показатељ <i>VCC</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	70
Сл. 5.2.4 R^2 показатељ <i>SOM</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	70
Сл. 5.2.5 R^2 показатељ <i>ITER</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	70
Сл. 5.2.6 R^2 показатељ <i>GA</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	71
Сл. 5.2.7 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом <i>HARM</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности	71
Сл. 5.2.8 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом <i>DIR</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	71
Сл. 5.2.9 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом <i>P</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	72
Сл. 5.2.10 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом <i>SOM</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности	72
Сл. 5.2.11 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом <i>ITER</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности	72
Сл. 5.2.12 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом <i>GA</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности	73
Сл. 5.2.13 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом <i>GA</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности	73
Сл. 5.2.14 Релативна грешка одређивања коефицијента k применом <i>GA</i> методе приликом варијације коефицијента нелинеарности.....	73
Сл. 5.2.15 Резистивна струја при различитим напонима напајања.....	74
Сл. 5.2.16 R^2 показатељ <i>POW</i> методе приликом варијације напона напајања	75

Сл. 5.2.17 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације напона напајања	75
Сл. 5.2.18 R^2 показатељ COM методе приликом варијације напона напајања	75
Сл. 5.2.19 R^2 показатељ $ITER$ методе приликом варијације напона напајања.....	76
Сл. 5.2.20 R^2 показатељ GA методе приликом варијације напона напајања.....	76
Сл. 5.2.21 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје приликом $HARM$ методе приликом варијације напона напајања.....	76
Сл. 5.2.22 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје приликом DIR методе приликом варијације напона напајања.....	77
Сл. 5.2.23 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака приликом P методе приликом варијације напона напајања	77
Сл. 5.2.24 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а приликом COM методе приликом варијације напона напајања	77
Сл. 5.2.25 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а приликом $ITER$ методе приликом варијације напона напајања.....	78
Сл. 5.2.26 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а приликом GA методе приликом варијације напона напајања.....	78
Сл. 5.2.27 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а приликом GA методе приликом варијације напона напајања.....	78
Сл. 5.2.28 Релативна грешка одређивања коефицијента k приликом GA методе приликом варијације напона напајања	79
Сл. 5.2.29 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје приликом POW методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	80
Сл. 5.2.30 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје приликом VCC методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	81
Сл. 5.2.31 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје приликом COM методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	82
Сл. 5.2.32 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје приликом $ITER$ методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	83
Сл. 5.2.33 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје приликом GA методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	84
Сл. 5.2.34 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања 3. хармоника резистивне струје приликом $HARM$ методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	85
Сл. 5.2.35 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку DIR методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б).....	86

Сл. 5.2.36 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку P методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б).....	87
Сл. 5.2.37 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом SOM методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	88
Сл. 5.2.38 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом $ITER$ методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	89
Сл. 5.2.39 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом GA методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	90
Сл. 5.2.40 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом GA методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б).....	91
Сл. 5.2.41 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања коефицијента k применом GA методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)	92
Сл. 5.2.42 R^2 показатељ POW методе приликом варијације капацитивности C_s	93
Сл. 5.2.43 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације капацитивности C_s	93
Сл. 5.2.44 R^2 показатељ SOM методе приликом варијације капацитивности C_s	94
Сл. 5.2.45 R^2 показатељ $ITER$ методе приликом варијације капацитивности C_s	94
Сл. 5.2.46 R^2 показатељ GA методе приликом варијације капацитивности C_s	94
Сл. 5.2.47 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом $HARM$ методе приликом варијације капацитивности C_s	95
Сл. 5.2.48 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом DIR методе приликом варијације капацитивности C_s	95
Сл. 5.2.49 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом P методе приликом варијације капацитивности C_s	95
Сл. 5.2.50 Релативна грешка одређивања максималне вредности основног хармоника резистивне струје приликом варијације капацитивности C_s	96
Сл. 5.2.51 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом SOM методе приликом варијације капацитивности C_s	96
Сл. 5.2.52 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом $ITER$ методе приликом варијације капацитивности C_s	96
Сл. 5.2.53 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом GA методе приликом варијације капацитивности C_s	97

Сл. 5.2.54 Релативна грешка одређивања капацитивности C_s МОП-а применом GA методе приликом варијације капацитивности C_s	97
Сл. 5.2.55 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП- а применом GA методе приликом варијације капацитивности C_s	97
Сл. 5.2.56 Релативна грешка одређивања коефицијента k МОП-а применом GA методе приликом варијације капацитивности C_s	98
Сл. 5.2.57 Резистивна струја одређена различитим методама при фазној грешци $\Delta\Phi=2^\circ$	99
Сл. 5.2.58 R^2 показатељ POW методе приликом варијације фазне грешке.....	99
Сл. 5.2.59 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације фазне грешке.....	99
Сл. 5.2.60 R^2 показатељ COM методе приликом варијације фазне грешке	100
Сл. 5.2.61 R^2 показатељ $ITER$ методе приликом варијације фазне грешке.....	100
Сл. 5.2.62 R^2 показатељ GA методе приликом варијације фазне грешке	100
Сл. 5.2.63 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом $HARM$ методе приликом варијације фазне грешке	101
Сл. 5.2.64 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом DIR методе приликом варијације фазне грешке	101
Сл. 5.2.65 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом P методе приликом варијације фазне грешке	101
Сл. 5.2.66 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом COM методе приликом варијације фазне грешке.....	102
Сл. 5.2.67 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом $ITER$ методе приликом варијације фазне грешке	102
Сл. 5.2.68 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом GA методе приликом варијације фазне грешке	102
Сл. 5.2.69 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП- а применом GA методе приликом варијације фазне грешке	103
Сл. 5.2.70 Релативна грешка одређивања коефицијента k применом GA методе приликом варијације фазне грешке	103
Сл. 5.3.1 Утицај коефицијента нелинеарности на промену виших хармоника укупне струје одвођења: (а) апсолутне вредности и (б) релативне вредности	108
Сл. 5.3.2 Утицај коефицијента нелинеарности на промену виших хармоника резистивне струје одвођења: (а) апсолутне вредности и (б) релативне вредности.....	109
Сл. 5.3.3 Релативна промена активне снаге губитака МОП-а при промени коефицијента нелинеарности	110
Сл. 5.3.4 Релативна промена максималне вредности резистивне струје при промени коефицијента нелинеарности.....	111

Сл. 5.3.5 Релативна промена коефицијента нелинеарности при промени стања МОП-а.....	111
Сл. 5.3.6 Релативна промена основног (а) и трећег (б) хармоника укупне струје при колебању напона, за нов и деградиран одводник	113
Сл. 5.3.7 Релативна промена основног (а) и трећег (б) хармоника резистивне струје при колебању напона, за нов и деградиран одводник	114
Сл. 5.3.8 Релативна промена активне снаге губитака при колебању напона	115
Сл. 5.3.9 Релативна промена максималне вредности резистивне струје при колебању напона.....	115
Сл. 5.3.10 Релативна промена коефицијента нелинеарности при колебању напона	115
Сл. 5.3.11 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)	117
Сл. 5.3.12 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	118
Сл. 5.3.13 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	119
Сл. 5.3.14 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	120
Сл. 5.3.15 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	121
Сл. 5.3.16 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	122
Сл. 5.3.17 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	123
Сл. 6.1.1 Експериментална поставка	127
Сл. 6.2.1 Измерени сигнали напона напајања и струје одвођења на $T_a=25^{\circ}\text{C}$ за (а) $U=0,9U_c$, (б) $U=U_c$, (ц) $U=1,1U_c$	129
Сл. 6.2.2 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на $T_a=25^{\circ}\text{C}$ за (а) $U=0,9U_c$, (б) $U=U_c$, (ц) $U=1,1U_c$	130
Сл. 6.2.3 Таласни облици измерене укупне струје на 25°C и укупне, капацитивне и резистивне струје одређене применом GA методе (а) $U=0,9U_c$ (б) $U=U_c$ (ц) $U=1,1U_c$	131

Сл. 6.2.4 Волт-амперске карактеристике одводника за различите ефективне вредности напона напајања	132
Сл. 6.3.1 Амплитуде (а) и фазни ставови (б) виших хармоника напона за анализирана три случаја.....	134
Сл. 6.3.2 Измерени сигнали напона и струје одвођења за три различита случаја садржаја виших хармоника у напону напајања (а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3.....	135
Сл. 6.3.3 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на $T_a=25^{\circ}\text{C}$ за (а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3.....	136
Сл. 6.3.4 Таласни облици измерене укупне струје на 25°C и укупне, капацитивне и резистивне струје одређене применом <i>GA</i> методе (а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3	137
Сл. 6.3.5 Волт-амперске карактеристике одводника за различите случајеве садржаја виших хармоника у напону напајања	138
Сл. 6.4.1 Измерени сигнали напона и струје одвођења при напону напајања једнаком U_c , за три различите вредности амбијенталне температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C	140
Сл. 6.4.2 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на три различите температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C	142
Сл. 6.4.3 Таласни облици измерене укупне струје и укупне и резистивне струје одређене применом <i>GA</i> методе за три различите вредности амбијенталне температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C	143
Сл. 6.4.4 Волт-амперске карактеристике одводника у случају различитих амбијенталних температура одређене <i>GA</i> методом (а) при напону напајања U_c (б) при варијацији напона и виших хармоника	144
Сл. П2.1 Хромозом са N променљивих величина	163
Сл. П2.2 Точак рулета након рангирања решења.....	165
Сл. П2.3 Принцип укрштања у једној тачки	166
Сл. П2.4 Принцип мутације.....	167
Сл. П3.0.1 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>POW</i> методе (R^2)	169
Сл. П3.0.2 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>VCC</i> методе (R^2)	169
Сл. П3.0.3 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>COM</i> методе (R^2).....	170
Сл. П3.0.4 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>ITER</i> методе (R^2)	170
Сл. П3.0.5 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (R^2).....	171
Сл. П3.0.6 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>HARM</i> методе	171
Сл. П3.0.7 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>DIR</i> методе.....	172
Сл. П3.0.8 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>P</i> методе	172
Сл. П3.0.9 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>COM</i> методе (коэффициент C)	173

Сл. ПЗ.0.10 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>ITER</i> методе (коэффициент C)	173
Сл. ПЗ.0.11 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (капацитивност C)	174
Сл. ПЗ.0.12 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (коэффициента).....	174
Сл. ПЗ.0.13 Утицај 5. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (коэффициент k).....	175
Сл. ПЗ.0.14 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>POW</i> методе (R^2)	175
Сл. ПЗ.0.15 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>VCC</i> методе (R^2)	176
Сл. ПЗ.0.16 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>COM</i> методе (R^2)	176
Сл. ПЗ.0.17 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>ITER</i> методе (R^2)	177
Сл. ПЗ.0.18 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (R^2).....	177
Сл. ПЗ.0.19 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>HARM</i> методе	178
Сл. ПЗ.0.20 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>DIR</i> методе.....	178
Сл. ПЗ.0.21 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>P</i> методе	179
Сл. ПЗ.0.22 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>COM</i> методе	179
Сл. ПЗ.0.23 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>ITER</i> методе	180
Сл. ПЗ.0.24 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе	180
Сл. ПЗ.0.25 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе	181
Сл. ПЗ.0.26 Утицај 7. хармоника напона на грешку <i>GA</i> методе (коэф. k)	181
Сл. П4.0.1 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)	182
Сл. П4.0.2 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	183
Сл. П4.0.3 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	184
Сл. П4.0.4 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	185
Сл. П4.0.5 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	186
Сл. П4.0.6 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	187

Сл. П4.0.7 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	188
Сл. П4.0.8 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)	189
Сл. П4.0.9 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	190
Сл. П4.0.10 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	191
Сл. П4.0.11 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	192
Сл. П4.0.12 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	193
Сл. П4.0.13 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	194
Сл. П4.0.14 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)	195
Сл. П5.0.1 Фотографија коморе за загревање са одводником пренапона.....	196
Сл. П5.0.2 Фотографија експерименталне поставке	196

ЛИСТА ТАБЕЛА

Таб. 5.1.1 Величине и параметри одводника који су коришћени у симулацијама	66
Таб. 5.2.1 Грешке метода за мониторинг МОП-а у зависности од промене услова напајања, модела МОП-а и фазне грешке.....	106
Таб. 5.3.1 Осетљивост и маргине показатеља стања МОП-а	125
Таб. 6.1.1 Основни подаци о одводнику MWK 7, произвођача АВВ.....	126
Таб. 6.2.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на амбијенталној температури $T=25^{\circ}\text{C}$ за различите напоне напајања.....	133
Таб. 6.3.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на амбијенталној температури $T=25^{\circ}\text{C}$ за три различита случаја виших хармоника.....	139
Таб. 6.4.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на различитим температурама.....	145

1. УВОД

Сигурно и поуздано снабдевање потрошача довољном количином електричне енергије задовољавајућег квалитета је један од основних задатака који се поставља пред електроенергетски систем (ЕЕС). Испуњењу овог циља доприносе производни, преносни и дистрибутивни капацитети једног ЕЕС-а. Међутим, развојем технологије како у области електроенергетике тако и у области информационих технологија, појављују се и други ресурси, тзв. дистрибуирани ресурси у виду дистрибуиране производње, складиштења енергије и управљања потрошњом који такође учествују у испуњењу овог циља кроз концепт интелигентних електроенергетских мрежа. Сигурно и поуздано снабдевање електричном енергијом подразумева минимизацију броја отказа елемената ЕЕС-а, као и минимизацију неиспоручене електричне енергије у случају да до отказа ипак дође. Да би се наведени задаци ЕЕС-а могли обавити, потребно је у систему имати адекватно управљање величинама којима се може управљати и адекватну заштиту од појава које се не могу контролисати због стохастике њиховог појављивања и брзине њиховог процеса. У појаве којима се не може управљати спадају и пренапони. Пренапони представљају свако повећање напона за више од 10% изнад назначене вредности напона опреме. Електроенергетска опрема, тачније изолација електроенергетске опреме није димензионисана да дуготрајно издржи оваква повећања напона и у складу са тим се мора на ефикасан начин заштитити од појаве пренапона. Један од заштитних уређаја јесте одводник пренапона, чија је улога да брзо и ефикасно заштити електроенергетску опрему од превеликих напрезања изолације у случају појаве пренапона. У случају да не постоје одводници пренапона, изолација опреме би морала бити димензионисана на тај начин да буде у могућности да поднесе и врло високе пренапоне који се краткотрајно могу јавити услед атмосферских пражњења или склопних операција. Оваква решења нису економски прихватљива.

Од када су први пут инсталирани у преносним и дистрибутивним мрежама, развијене су две генерације савремених одводника пренапона. Првој генерацији припадају силицијум-карбидни (SiC) одводници са искриштем, док другој генерацији припадају металоксидни одводници пренапона (МОП). Металоксидни

одводници пренапона су инсталирани у преносни и дистрибутивни електроенергетски систем пре око 30 година. Током велике већине свог животног века, одводници пренапона се понашају као изолатори на фазном напону мреже на коју су прикључени. У нормалном раду, кроз МОП протиче мала струја одвођења која је последица трајног прикључења МОП-а на радни напон мреже. У странијој литератури се ова струја назива струја „цурења“ (*leakage current*). Само се у појединим моментима одводници пренапона понашају као нискоомске везе којима се енергија садржана у пренапонима који се јављају у тим моментима одводи у земљу преко уземљивача за које су везани сами одводници пренапона. Показује се да се заштитна карактеристика МОП-а одржава током читавог животног века, међутим њихово изолационо својство при трајном радном напону мреже је особина која је подложна променама и изазива деградацију самих одводника [1]. У екстремним случајевима ово може довести до повећања струје одвођења МОП-а и повећања губитака активне снаге, а самим тим доводи и до повећаног загревања МОП-а што додатно доприноси његовој деградацији. До деградације, када се карактеристике МОП-а неповратно мењају, долази услед великог броја фактора, као што су: неправилан избор МОП-а, старење МОП-а узроковано трајним радним напонам мреже, убрзано старење узроковано струјним напрезањима, продор влаге у кућиште МОП-а, утицај атмосферских прилика и др [2], [3], [4].

Од тренутка првог инсталирања одводници пренапона су функционисали добро, без преке потребе за посебним мониторингом и дијагностиком. Једини уређаји за континуално праћење рада МОП-а који су до сада коришћени јесу контролна искришта, бројачи пражњења и једноставни милиамперметри који се не сврставају у уређаје за мониторинг и дијагностику него у уређаје за праћење рада МОП-а. Може се сматрати да је у овом тренутку велики број одводника пренапона у погону близу краја свог очекиваног животног века. Управо је из тог разлога веома актуелна тема мониторинга и дијагностике ових одводника пренапона.

Дерегулација енергетског тржишта широм света повећава економски притисак на електропривредна предузећа. Ова чињеница може довести до повећаног ризика од евалуације електроенергетске опреме па и самих одводника

пренапона више према њиховој цени него према квалитету. Свакако се не може гарантовати да ће квалитет и високи стандарди производње електроенергетске опреме појединих произвођача бити барем до неке мере очувани од стране произвођача јефтине опреме. Ово је још један од разлога зашто би мониторинг опреме требало да осигура високе стандарде заштите и дуг животни век опреме. Иако су са аспекта цене средњенапонских, а поготово високонапонских елемената ЕЕС-а, одводници пренапона релативно јефтина опрема, њихов веома важан задатак заштите друге, релативно скупе електроенергетске опреме, битно подиже вредност самих одводника у погону.

Све горе наведене чињенице указују на важност спровођења адекватног мониторинга и дијагностике МОП-а. До сада је развијен велики број метода за мониторинг и дијагностику које су базиране како на мерењима у погону (*on-line* методе), тако и на мерењима која захтевају прекид погона (*off-line* методе). Највише примењиване методе за процену стања МОП-а јесу методе базиране на анализи струје одвођења која се јавља услед деловања трајног радног напона. Методе на бази анализе струје одвођења које су анализирани у овој докторској дисертацији су:

- метода хармонијске анализе струје одвођења [1], [5], [6];
- метода директног читавања резистивне компоненте струје одвођења [6];
- метода губитака активне снаге [1];
- метода компензације капацитивне компоненте струје одвођења [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12];
- метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења [13];
- метода основног хармоника резистивне компоненте струје одвођења [14];
- итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје одвођења [15];

Постоје и методе које се базирају на примени специјалних електронских мерних кола за детекцију резистивне компоненте струје одвођења, међутим ове методе нису нашле ширу примену [16], [17]. Поред наведених метода, у новијим научно-истраживачким радовима се могу пронаћи методе базиране на примени вештачких неуралних мрежа [18], [19], [20], [21], [22], [23]. С обзиром да су ове

методе доминантно базиране на анализи температурне слике одводника у овој дисертацији нису детаљније анализиране.

Иако се методе базиране на анализи струје одвођења при радном напону мреже широко примењују, поред својих предности, свака од ових метода има и одређене мане. Недостаци појединих метода се јављају у случају присуства виших хармоника у радном напону, услед варирања амплитуде радног напона, услед појаве грешака приликом мерења релевантних величина и сл. [24], [25].

У овој докторској дисертацији је извршена анализа свих наведених утицајних фактора на показатеље стања МОП-а који се одређују применом набројаних метода. Као решење недостатака постојећих метода на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже, у овој дисертацији је развијена нова метода која је базирана на примени оптимизационог генетског алгоритма за одређивање параметара који су одлични показатељи стања самог МОП-а [26].

Сва истраживања су спроведена коришћењем квантитативних метода базираних на рачунарским симулацијама и на лабораторијским експериментима. Применом рачунарских симулација, у програмском пакету MATLAB [27], [28], извршена је анализа перформанси постојећих метода за одређивање стања одводника пренапона базираних на анализи струје одвођења. Рачунарским симулацијама су испитани утицаји виших хармоника напона, утицаји колебања напона као и утицаји појаве фазне грешке приликом мерења радног напона и струје одвођења. Нова метода за одређивање параметара еквивалентне шеме одводника пренапона, базирана на генетском алгоритму, јесте такође развијена у програмском пакету MATLAB. Рачунарским симулацијама је извршена компаративна анализа постојећих и новоразвијене методе. Осим рачунарских симулација извршена су и лабораторијска испитивања метода за мониторинг МОП-а коришћењем 10 kV металоксидног одводника пренапона. Методе су анализиране у различитим условима напајања МОП-а, варирањем садржаја виших хармоника напона напајања, варирањем амплитуде напона напајања и варирањем амбијенталне температуре. Варирањем амбијенталне температуре се постиже промена електричних карактеристика МОП-а чиме се симулира његова деградација. Одводник је испитан при различитим амбијенталним температурама користећи специјано направљену комору за загревање МОП-а под напоном. Сва

лабораторијска испитивања су спроведена у Лабораторији за високи напон Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Докторска дисертација је организована у 7 поглавља.

У првом поглављу су представљена уводна разматрања и дат је преглед тренутног стања у области мониторинга и дијагностике МОП-а на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже.

Друго поглавље се односи на конструкционе и електричне карактеристике МОП-а. Представљене су еквивалентне шеме МОП-а на бази којих су развијени сви алгоритми за мониторинг и дијагностику МОП-а. Такође је анализиран утицај температуре на волт-амперску карактеристику МОП-а.

У трећем поглављу су анализирани актуелне методе за мониторинг и дијагностику МОП-а. Дат је кратак преглед *on-line* и *off-line* метода које се не базирају на анализи струје одвођења, док су методе на бази анализе струје одвођења детаљно приказане у оквиру овог поглавља.

Четврто поглавље се односи на примену оптимизационих метода за одређивање параметара еквивалентних шема МОП-а. Дат је кратак преглед постојећих метода и детаљно је описана новоразвијена метода којом се елиминишу недостаци метода базираних на анализи струје одвођења.

Пето поглавље детаљно описује рачунарске симулације које су спроведене са циљем компаративне анализе постојећих и новоразвијене методе у различитим експлоатационим условима. Резултати симулација су такође приказани у овом поглављу.

Шесто поглавље се односи на лабораторијска испитивања. Детаљно је приказана експериментална поставка, описана је процедура извођења експеримената и дати су резултати спроведених анализа.

У седмом поглављу су истакнути основни закључци ове докторске дисертације и наглашени су њени главни доприноси.

2. МЕТАЛОКСИДНИ ОДВОДНИЦИ ПРЕНАПОНА

2.1. Уводна разматрања

Одводници пренапона представљају једне од најважнијих елемената електроенергетских система са аспекта заштите. Улога одводника пренапона је да ограничи високе напоне (пренапоне), који се могу јавити у мрежи, на вредности напона које изолација електроенергетске опреме може да поднесе. Пренапони се могу класификовати према два критеријума: према дужини трајања и према узроку настанка. Према дужини трајања, пренапони се могу поделити на напонске ударе, ако трају краће од 60 s, и на привремене пренапоне, ако трају дуже од 60 s. Према узроку настанка, пренапони се могу поделити у две категорије: спољашњи (атмосферски пренапони) и унутрашњи пренапони. Спољашњи пренапони настају услед атмосферских пражњења (удара грома) у објекат или у близину објекта када долази до индуковања пренапона. Унутрашњи пренапони настају услед поремећаја у самом систему и могу се поделити на склопне пренапоне и привремене пренапоне. Изолација електроенергетске опреме није димензионисана да издржи оваква напрезања и у складу са тим се мора на ефикасан начин заштитити. Најважније уређаје за заштиту од пренапона чине одводници пренапона [29].

Од када су први пут инсталирани у преносним и дистрибутивним мрежама око 1930. године, развијене су две генерације савремених одводника пренапона. Првој генерацији припадају силицијум-карбидни (SiC) или класични одводници пренапона са искриштем, док другој генерацији припадају металоксидни (МОП) или цинк-оксидни (ZnO) одводници пренапона. Одводници пренапона се најчешће постављају између фазних проводника и земље. Основна карактеристика одводника пренапона јесте нелинеарна волт-амперска карактеристика која омогућава да се одводник у нормалном раду, на трајном радном напону мреже, понаша као изолатор, док у случају појаве пренапона одређене амплитуде и стрмине таласа одводник постаје нискоомски отпорник и одводи део енергије пренапона у земљу. Разлика између класичних одводника пренапона и МОП-а је управо у степену нелинеарности волт-амперске

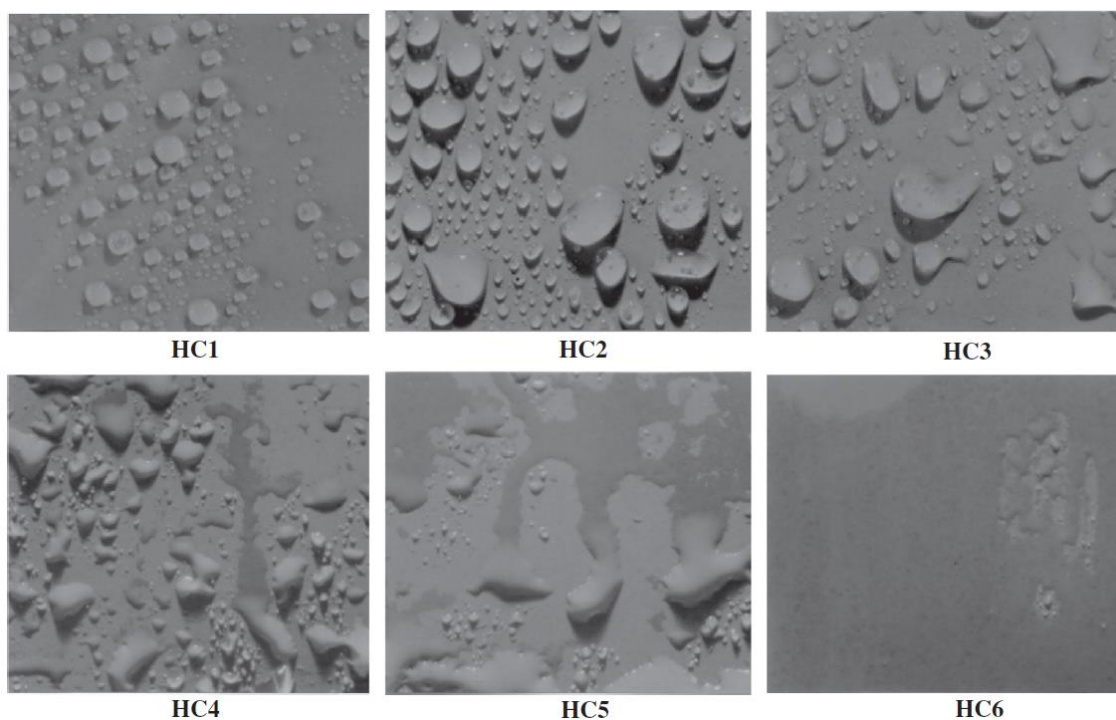
карактеристике [30]. Класични одводници пренапона имају много мање изражену нелинеарност, што представља разлог зашто се ови одводници обавезно праве са искриштем. Наиме, класични одводник пренапона се прави од редне везе искришта и нелинеарних отпорника од силицијум-карбида. Искриште има улогу склопног уређаја који омогућава да одводник проведе када напон на искришту пређе неку одређену вредност потребну за појаву прескока на искришту (напон реаговања), а прекида струју кроз одводник када струја прође кроз нулу. Нелинеарни отпорник ограничава струју која протиче услед радног напона мреже све док се проласком кроз нулу ова струја не прекине. Према конструкцији, класични одводници пренапона се могу поделити на одводнике са тањирастим искриштем и одводнике са електромагнетским одувавањем лука [29]. У електроенергетском систему, поготово у средњенапонским мрежама и даље постоји велики број класичних одводника пренапона у функцији, међутим они се више не производе.

Концепт металоксидних одводника пренапона је први пут приказан седамдесетих година прошлог века, када су интензивно вршена технолошка унапређења овог концепта [31]. С обзиром на веома изражену нелинеарност волт-амперске карактеристике, металоксидни одводници се праве само од редне везе нелинеарних отпорника доминантно од цинк-оксида. Имајући у виду да немају искриште, у нормалном раду кроз МОП протиче мала струја одвођења која је последица трајног прикључења МОП-а на радни напон мреже. Због велике нелинеарности, тј. великог степена изолованости МОП-а у случају трајног радног напона, ова струја одвођења има веома мале вредности, реда 1 mA. Међутим, доказано је да се у случају деградације МОП-а струја одвођења повећава и да мења своје карактеристике. Управо је ова чињеница омогућила мониторинг и дијагностику МОП-а у погону јер се показује да су поједини параметри струје одвођења одлични показатељи стања МОП-а. Наредна потпоглавља опширније описују конструкцију и електричне карактеристике МОП-а.

2.2. Конструкција МОП-а

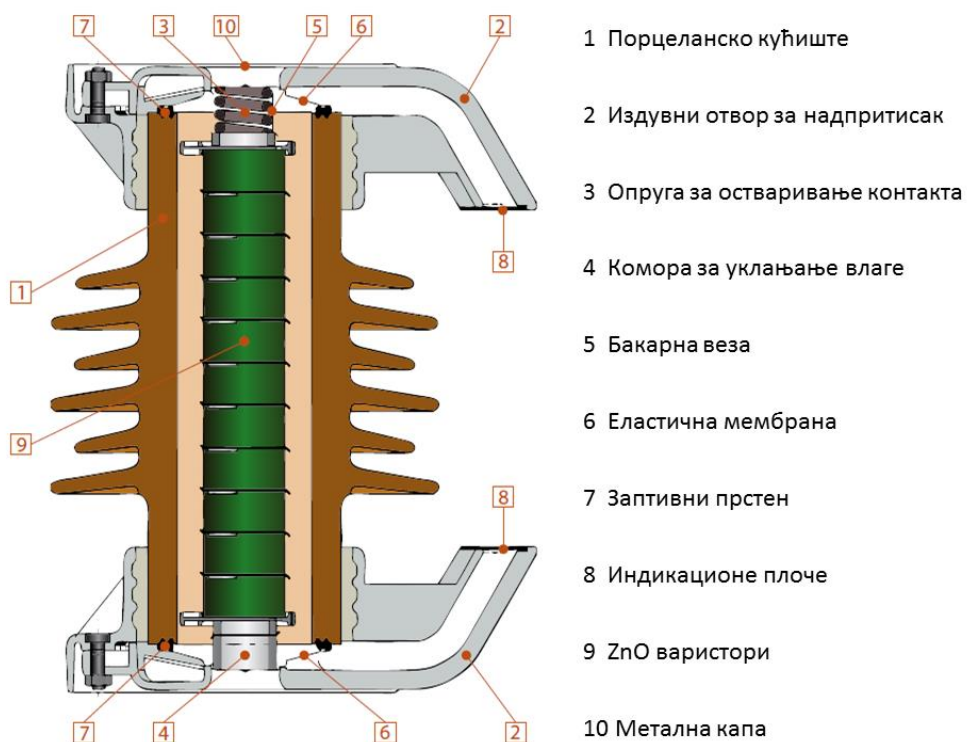
Упрошћено гледано, металоксидни одводници пренапона се састоје из два дела: активног дела који чине један или више међусобно редно повезаних ZnO варистора; изолационог кућишта чија је улога да обезбеди електричну изолацију активног дела и механичку чврстоћу одводника [32]. Суштински постоје два типа изолационог кућишта у зависности од материјала од кога се производе. Порцеланска кућишта су се користила код класичних одводника пренапона, међутим и металоксидни одводници су се у почетку своје производње правили искључиво у порцеланским кућиштима. Оваква кућишта су показала већи број негативних особина, као што су: повећан број потребних елемената (додатне опреме) за производњу одводника пренапона, тежина, проблеми са продором влаге унутар кућишта, проблеми са запрљањем и формирањем пузајућих струја по површини кућишта, опасност од експлозије приликом појаве натпритиска у кућишту и сл. Најновије генерације МОП-а се производе у полимерним кућиштима и то коришћењем једног од три основна концепта производње: (1) активни део се ставља у цев од фибергласа која се затим пресвлади изолационим материјалом; (2) активни део се умотава у материјал од фибергласа и затим се заједно утапају у смолу која им даје чврстоћу, па се убацују у унапред припремљено кућиште од полимерног материјала; (3) активни део се учвршћује рамом од фибергласа, а затим се полимерно кућиште директно излива на сам активни део. Предности трећег начина израде се огледају у томе што није потребно посебно заптивање одводника, продор влаге у кућиште је практично немогућ па се не јављају ни парцијална пражњења, а вероватноћа од експлозије одводника је занемарљива [32]. Материјал од кога се праве полимерна кућишта је силиконска гума. Поред високе еластичности и отпорности пуцању, високе температурне стабилности, мале вероватноће паљења и велике диелектричне чврстоће, основна предност силикона јесте хидрофобност. Наиме, вода остаје на површини силиконског изолатора у облику капљица и са њега отпада. Не постоји могућност формирања струјних путева по површини изолатора узрокованих влагом, чак и у условима повећане запрљаности одводника [32], [33]. Може се десити да се особина хидрофобности редукује у случају дугог периода високе влажности амбијента или парцијалних пражњења по површини одводника,

међутим хидрофобност се у кратком периоду може у потпуности обновити. Класификација полимерних материјала према нивоу хидрофобности се може извршити стандардним тестовима, а кућишта се могу класификовати у 6 различитих група од НС1 (највиши ниво хидрофобности) до НС6 (најнижи ниво хидрофобности) [34]. На Сл. 2.2.1 су приказане све класе хидрофобности полимерних кућишта.

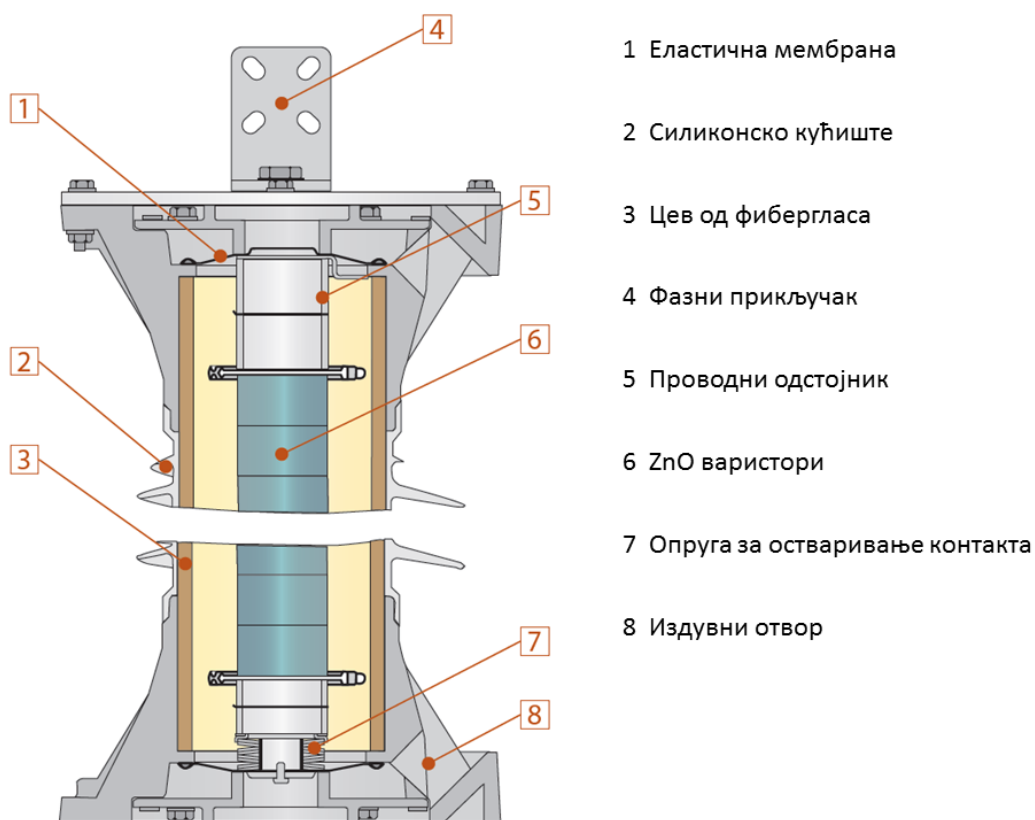


Сл. 2.2.1 Класе хидрофобности полимерних кућишта [34]

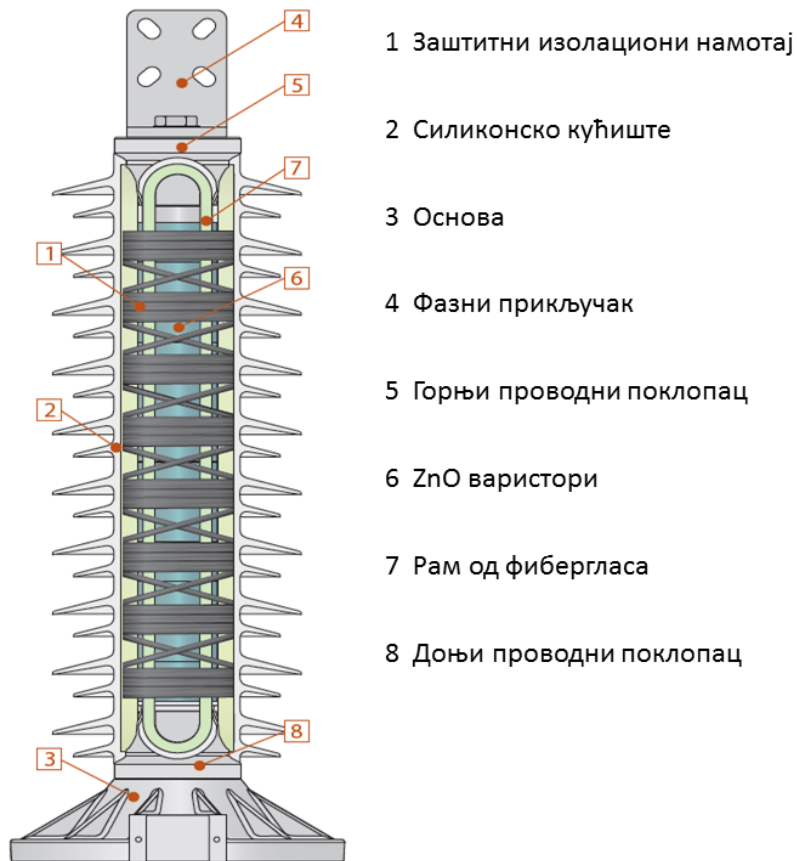
На Сл. 2.2.2, која је преузета из брошуре произвођача [35], је приказана конструкција МОП-а са порцеланским кућиштем. На Сл. 2.2.3 и Сл. 2.2.4 је приказана конструкција МОП-а са полимерним кућиштем за типове производње 2 и 3 респективно.



Сл. 2.2.2 МОП са порцеланским кућиштем [35]



Сл. 2.2.3 МОП са полимерним кућиштем типа производње 2 [35]



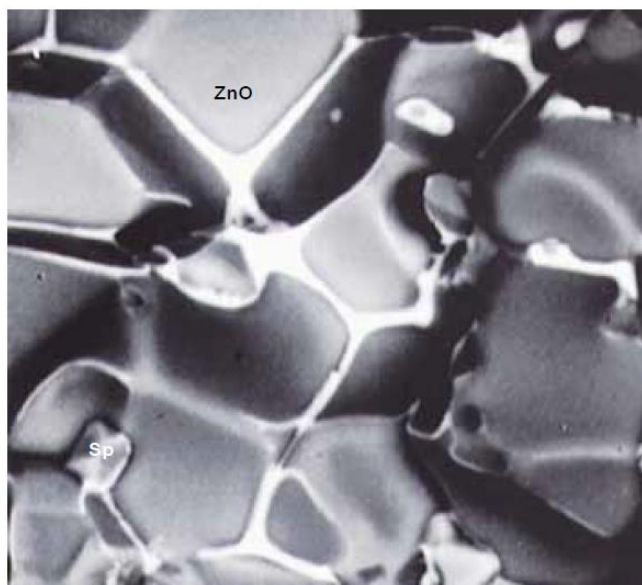
Сл. 2.2.4 МОП са полимерним кућиштем типа производње 3 [35]

Активни део одводника, као што је речено, се прави од варистора који се слажу један на други. Поступком синтеровања на високим температурама (1200 °C), варистори који се праве од гранула цинк-оксида са додатим адитивима се истискују у ваљкасте блокове. Димензије ових блокова варирају у зависности од њихове намене и карактеристика самог материјала, а код различитих произвођача се пречници углавном крећу у опсегу 3-10 cm, а висине у опсегу 2-5 cm. Пречник, тј. површина попречног пресека варистора дефинише његову подносиву струју, висина дефинише подносиви напон, а запремина варистора дефинише апсорпциону моћ. Другим речима, димензијама коришћеног варистора је диктирана класа одводника пренапона [32]. Подносиви напон варистора се такође може варирати мењањем величине зрна цинк-оксида, а ове вредности се крећу од 200 – 400 V/mm [36]. Да би се обезбедио бољи контакт површина варистора које се међусобно додирују, база варистора је пресвучена танким слојем метала. На Сл. 2.2.5 су приказани цинк-оксидни варистори различитих

димензија, а на Сл. 2.2.6 је приказана микроскопска структура варистора. На Сл. 2.2.6 се јасно виде ZnO грануле и међугрануларни простор.



Сл. 2.2.5 ZnO варистори [32]



Сл. 2.2.6 Микроскопска структура ZnO варистора [32]

Као адитиви међугрануларног простора се најчешће користе оксиди бизмута, мангана, хрома, антимона и кобалта (Bi_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , Sb_2O_3 , CoO) [37]. Управо садржај ових адитива дефинише нелинеарну волт-амперску карактеристику варистора и представља технолошко решење произвођача.

Број варистора везаних на ред зависи од напонског нивоа за који се намењује одводник. Комплетна конструкција са активним делом у кућишту се назива једна јединица одводника. Више оваквих јединица се могу везати на ред у циљу добијања одводника за више напонске нивое. Овакви високонапонски одводници су обично додатно опремљени прстеном за равномерну расподелу

потенцијала. Без овог прстена би неравномерна расподела напона по одводнику, проузрокована паразитним капацитивностима варистора према земљи, изазвала неравномерно оптерећење варистора што би додатно убрзало деградацију појединих варистора, а тиме и целог одводника. Осим везивања на ред, јединице одводника се могу везивати и у паралелу како би се повећала апсорпциона моћ одводника. Такође се и паралелне везе активних делова могу наћи и унутар једног кућишта [36].

Поред прстенова за равномерну расподелу потенцијала високонапонских одводника пренапона и елемената описаних на Сл. 2.2.2 - Сл. 2.2.4, постоји и друга додатна опрема која се може опционо користити према потреби. У ову опрему спадају милиамперметар, бројач пражњења, контролно искриште и уређај за одвајање одводника у случају отказа [38].

2.3. Волт-амперска карактеристика и карактеристичне величине МОП-а

Волт-амперска карактеристика је једна од најважнијих карактеристика МОП-а. Изразита нелинеарност ове карактеристике представља основну предност МОП-а у односу на класичне одводнике пренапона. Волт-амперска карактеристика МОП-а омогућава ограничење напона на крајевима МОП-а при одвођењу струје атмосферског и склопног пренапона на вредности које су ниже од вредности краткотрајног подносивог напона изолације опреме која се штити. Друга битна особина волт-амперске карактеристике је да ограничава струје одвођења при радном напону мреже (након проласка пренапона) на веома мале вредности што омогућава да овај тип одводника функционише без искришта. Такође, последица ове особине је непостојање велике пропратне струје која постоји код класичних одводника пренапона пре него што се лук угаси проласком ове струје кроз нулу. Као што је напоменуто у претходном поглављу, ова изразита нелинеарност потиче од међугрануларног простора кога чине адитиви који се додају приликом производње варистора [39], [40].

Електрична карактеристика варистора се може приказати зависношћу електричног поља и густине струје. Међутим, сматрајући да је густина струје униформна по површини попречног пресека, зависност варистора висине H и површине попречног пресека S се може приказати струјно-напонском, тј. волт-

амперском карактеристиком [37]. Волт-амперска карактеристика се може поделити у три основне области: (1) област мале јачине електричног поља; (2) област средње јачине електричног поља; (3) област велике јачине електричног поља.

У области мале јачине електричног поља, којој припада рад МОП-а под трајним радним напонем, варистори практично представљају велики број проводних зрна од цинк-оксида који су међусобно изоловани међугрануларним простором. Они чине мрежу капацитивности па је и струја одвођења у овој области претежно капацитивна. Ипак, постоји мала резистивна вредност струје одвођења која је последица чињенице да у области напона до трајног радног напона ипак постоји провођење међугрануларног простора.

У области средње јачине електричног поља, која одговара условима при наиласку пренапона, долази до повећања струје одвођења која је доминантно последица повећања резистивне компоненте струје одвођења. У овој области се напон на крајевима одводника веома мало повећава што је веома битна заштитна карактеристика одводника.

У области велике јачине електричног поља, долази до наглог повећања напона на крајевима одводника. Ово се дешава у случају лошег избора одводника, односно појаве струје пражњења чија је амплитуда већа од очекиваних вредности.

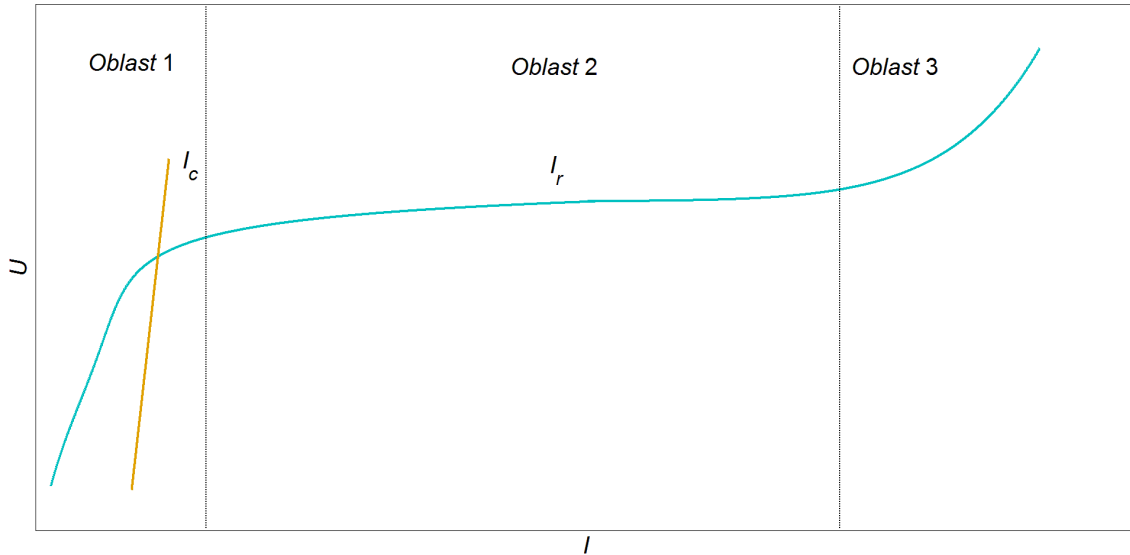
У области 1 и 2 нелинеарна резистивна карактеристика међугрануларног простора се може описати једначином [13], [32]:

$$\frac{i_r}{i_{ref}} = k \cdot \left(\frac{u}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.3.1)$$

У једначини (2.3.1) i_r представља резистивну компоненту струје одвођења, u представља напон на крајевима одводника, i_{ref} и U_{ref} су референтне вредности напона и струје које ће бити дефинисане на крају овог поглавља, k је карактеристика материјала и α је такође карактеристика материјала зависна од напона на крајевима одводника и температуре. За област мале јачине електричног поља се може сматрати да је коефицијент $\alpha \leq 5$, док се за област средње јачине поља може сматрати да се коефицијент α креће око 50.

На Сл. 2.3.1 је приказана волт-амперска карактеристика МОП-а са јасно означеним поменутиим областима. Приказана резистивна струја одговара

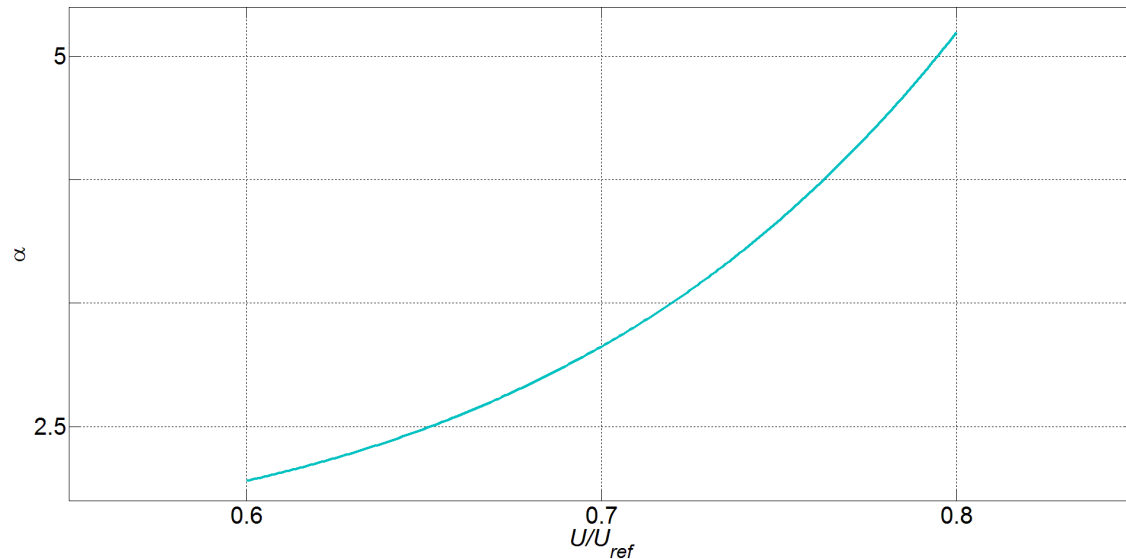
зависности дефинисаној једначином (2.3.1), док је капацитивна струја линеарно зависна од напона. Потребно је напоменути да укупна струја одвођења представља збир капацитивне и резистивне компоненте.



Сл. 2.3.1 Волт-амперска карактеристика ZnO одводника пренапона

Са Сл. 2.3.1 је јасно уочљиво да је у области 1, тзв. области малих струја, доминантна капацитивна компонента, док је резистивна компонента за ред величине мања. У области 2, тј. области великих струја доминантна је резистивна компонента. Потребно је нагласити да је за даље анализе, поготово са аспекта мониторинга и дијагностике МОП-а, од интереса само област малих струја па ће се сва даља разматрања вршити искључиво само за ову област.

Као што је речено, коефицијент нелинеарности α зависи од напона МОП-а и од температуре. Утицај температуре је анализиран у наредном поглављу, а зависност коефицијента нелинеарности од ефективне вредности напона у области малих струја је приказана на Сл. 2.3.2 [13]. Са Сл. 2.3.2 се може закључити да се у уском опсегу напона зависност коефицијента нелинеарности и напона може апроксимирати линеарном везом. Опсегом напона на Сл. 2.3.2 је обухваћена вредност трајног радног напона.

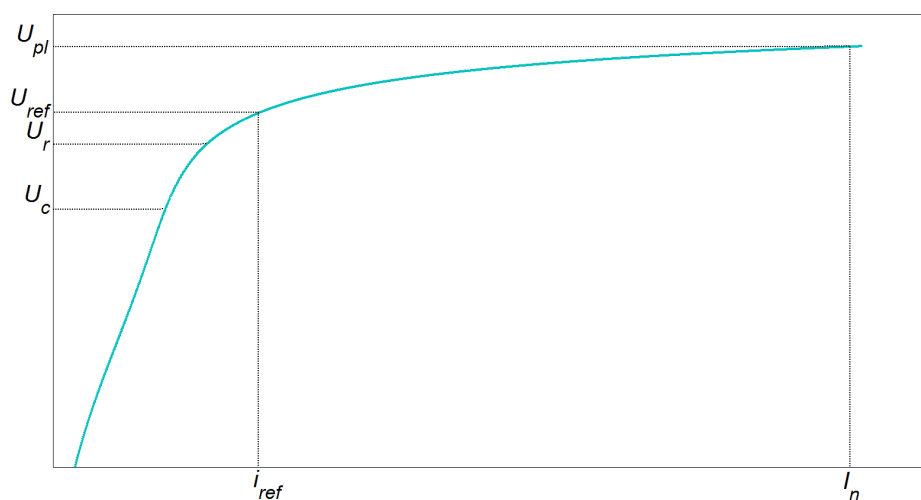
Сл. 2.3.2 Зависност коефицијента нелинеарности α од напона

За одводнике пренапона се стандардима дефинише већи број величина које показују његову карактеристику како при трајном радном напону тако и приликом наиласка пренапона, тј. на различитим деловима волт-амперске карактеристике МОП-а. Два су основна стандарда, ANSI/IEEE [41], [42] и IEC [43], [44], о металоксидним одводницима пренапона којима се дефинишу основне карактеристике МОП-а, начин избора МОП-а и основни тестови који се на њима изводе. Неке од карактеристичних величина МОП-а према IEC стандарду су [43]:

1. Трајни радни напон U_c – ефективна вредност напона мрежне учестаности који се може трајно довести на крајеве МОП-а;
2. Струја одвођења i_t – струја која протиче кроз одводник при напону U_c . У овој области је струја готово чисто капацитивна, померена у односу на напон за скоро 90° и реда је величине око 1 mA. Ова струја се назива и струја „цурења“ (*leakage current*);
3. Назначени напон U_r – максимална дозвољена ефективна вредност напона мрежне учестаности на крајевима МОП-а за који је МОП пројектован да ради при појави привремених пренапона. Стандардно је однос назначеног и трајног радног напона 1,25, иако ова вредност није нигде дефинисана.
4. Референтни напон U_{ref} – вршна вредност напона мрежне учестаности подељена са $\sqrt{2}$ при којем је струја одвођења једнака референтној струји;

5. Референтна струја i_{ref} – вршна вредност резистивне компоненте струје одвођења. Ова струја се дефинише од стране произвођача тако да се налази на колону волт-амперске карактеристике и има претежно резистивну компоненту;
6. Заостали напон U_{res} – вршна вредност напона на крајевима одводника при провођењу ударне струје;
7. Називна струја пражњења одводника I_n – вршна вредност ударне струје атмосферског пражњења која се користи за класификацију одводника. У зависности од класе одводника, ова струја има вредности 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA или 20 kA;
8. Заштитни ниво при атмосферским пренапонима U_{pl} – максимално дозвољена вршна вредност напона на крајевима одводника при провођењу називне ударне струје;
9. Заштитни ниво при склопним пренапонима U_{ps} – максимално дозвољена вршна вредност напона на крајевима одводника при провођењу склопних ударних струја.

Овде је потребно нагласити да се дефиниције неких величина могу разликовати у ANSI/IEEE стандарду и треба бити обазрив по овом питању да не би дошло до забуне [45], [46]. Постоје и бројне друге величине које се дефинишу, али овде нису од интереса и неће бити набрајане. Неке дефинисане величине су означене на волт-амперској карактеристици на Сл. 2.3.3.

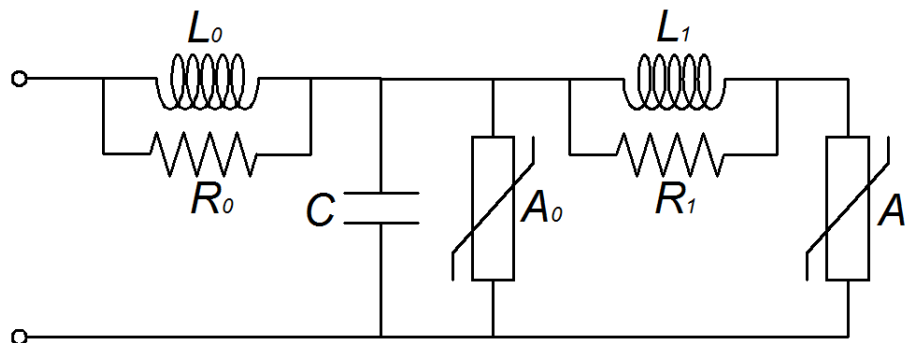


Сл. 2.3.3 Дефиниција карактеристичних величина МОП-а

2.4. Еквивалентне шеме МОП-а

Са аспекта појава које се анализирају, могуће је издвојити два различита типа еквивалентних шема МОП-а: (1) динамички модел МОП-а и (2) статички модел МОП-а. Велики напор је уложен како би се дугогодишњим истраживањима дошло до модела, тј. еквивалентних шема МОП-а који на најефикаснији начин репрезентују све битне карактеристике МОП-а са аспекта посматраних појава. Приликом моделовања је битно постићи најбоље могуће поклапање одзива модела и реалног репрезента, а уједно је потребно тежити једноставности модела са што мањим бројем утицајних параметара.

Динамички модели МОП-а се користе у случају анализа понашања одводника при наиласку пренапона стрмог чела. Битне динамичке особине МОП-а су пораст напона на крајевима одводника са скраћењем трајања чела пренапонског таласа и достизање вршне вредности напона пре него што струја кроз одводник достигне вршну вредност [47]. Радна група IEEE је 1992. године предложила динамички, фреквенцијски зависан модел МОП-а који се најчешће користи приликом динамичких анализа [47]. Овај модел је приказан на Сл. 2.4.1.

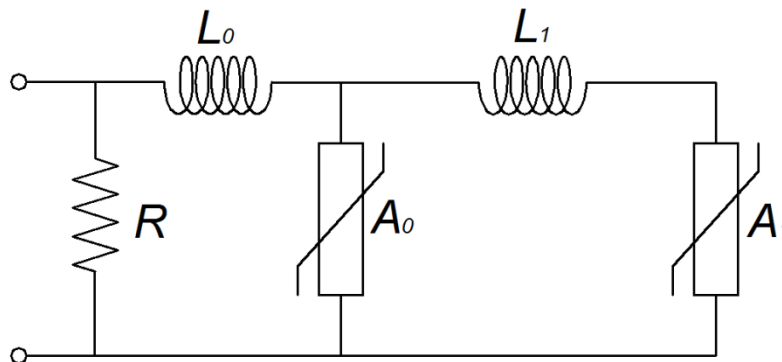


Сл. 2.4.1 Динамички модел МОП-а IEEE радне групе [47]

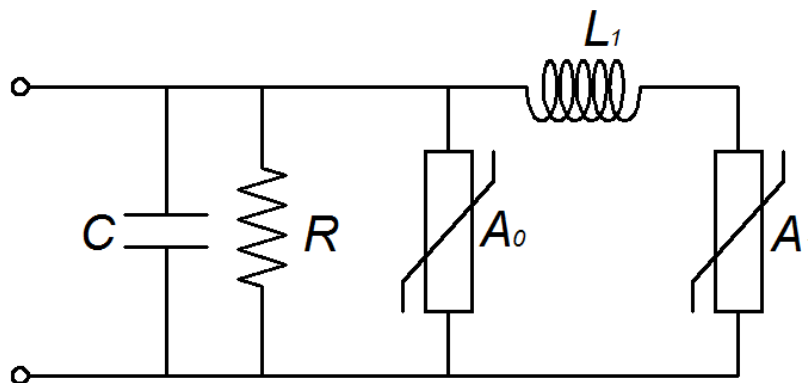
У моделу приказаном на Сл. 2.4.1 је нелинеарна карактеристика међугрануларног простора МОП-а представљена помоћу две секције нелинеарних отпорника A_0 и A_1 . Капацитивност C представља капацитивност ZnO зрна која су међусобно изолована. Поред ових елемената, модел садржи и две паралелне RL гране. У случају дугог трајања чела таласа пренапона ове гране имају веома малу импедансу па су практично нелинеарни отпорници и кондензатор везани у паралелу. За брзе пренапоне, кратког времена чела, ове импедансе добијају на значају што резултује већом струјом у нелинеарном отпорнику A_0 у односу на A_1 .

Такође, карактеристике нелинеарних отпорника су такве да је за исту струју већи напон на отпорнику A_0 него на A_1 . Резултат овога је појава већег напона на крајевима МОП-а за пренапоне стрмијег чела, што одговара стварним лабораторијским експериментима. Тачнији динамички модели се могу добити додавањем више секција нелинеарних резистора међусобно раздвојених RL гранама.

Поред динамичког модела предложеног од стране IEEE радне групе, постоје и алтернативни модели који се често могу срести у литератури. Два најчешће коришћена су *Pinceti-Giannettoni* модел и *Fernandez-Diaz* модел [48], [49], [50]. Еквивалентне шеме ових модела су приказане на Сл. 2.4.2 и Сл. 2.4.3, респективно.



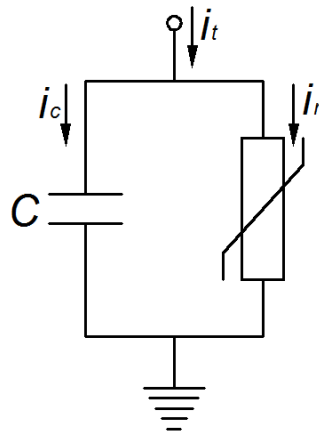
Сл. 2.4.2 *Pinceti-Giannettoni* динамички модел МОП-а [48]



Сл. 2.4.3 *Fernandez-Diaz* динамички модел МОП-а [49]

Осим модела који су развијени за анализу понашања МОП-а при одвођењу ударних струја, веома су значајни и статички модели МОП-а за анализу одзива одводника у нормалним условима рада. Управо су ови модели од интереса за

методе мониторинга и дијагностике одводника пренапона. Као што је већ речено у претходним поглављима, у нормалним условима рада кроз ZnO одводнике пренапона константно протиче мала струја одвођења која се састоји од доминантне линеарне капацитивне компоненте и за ред величине мање нелинеарне резистивне компоненте. У складу са тим се доминантно користи тзв. упрошћен модел МОП-а који се састоји од две паралелне гране као што је приказано на Сл. 2.4.4.



Сл. 2.4.4 Упрошћен модел МОП-а

Осим тога, постоје и модели који на ред са паралелном везом капацитивности и нелинеарне отпорности уважавају и линеарну отпорност ZnO гранула, међутим та отпорност је веома мала и најчешће се занемарује у анализама. Математички модел који описује упрошћену еквивалентну шему МОП-а се може изразити као:

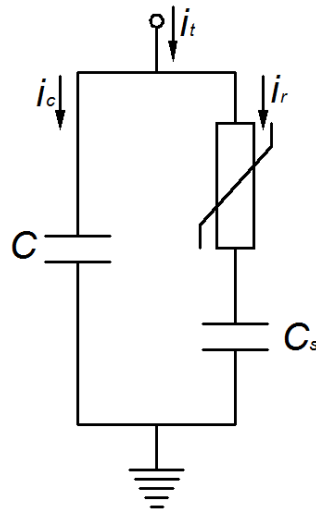
$$u_r = u \quad (2.4.1)$$

$$i_t = C \cdot \frac{du}{dt} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_r}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.4.2)$$

У изразима (2.4.1) и (2.4.2) су: u_r - напон на нелинеарном отпорнику, u - напон на одводнику, i_t - укупна струја одвођења, C - укупна капацитивност одводника, k и α - коефицијенти који одређују резистивну струју одвођења према једначини (2.3.1), а i_{ref} и U_{ref} су референтна струја и референтни напон.

Иако је модел на Сл. 2.4.4 најчешће коришћен у анализама нормалног рада МОП-а и у методама за мониторинг и дијагностику МОП-а, показује се да постоје одређена одступања овог модела од мерења која су добијена у лабораторијским

условима. Најзначајнија одступања се односе на чињеницу да је у лабораторијским условима показано да постоји фазни померај између радног напона МОП-а и нелинеарне компоненте струје, тј. да волт-амперска карактеристика показује особине хистерезиса при наизменичном напону. Да би се ови ефекти узели у обзир, развијен је проширен модел МОП-а који је приказан на Сл. 2.4.5 [15].



Сл. 2.4.5 Проширен модел МОП-а [15]

Математички модел који описује проширену еквивалентну шему МОП-а се може изразити као:

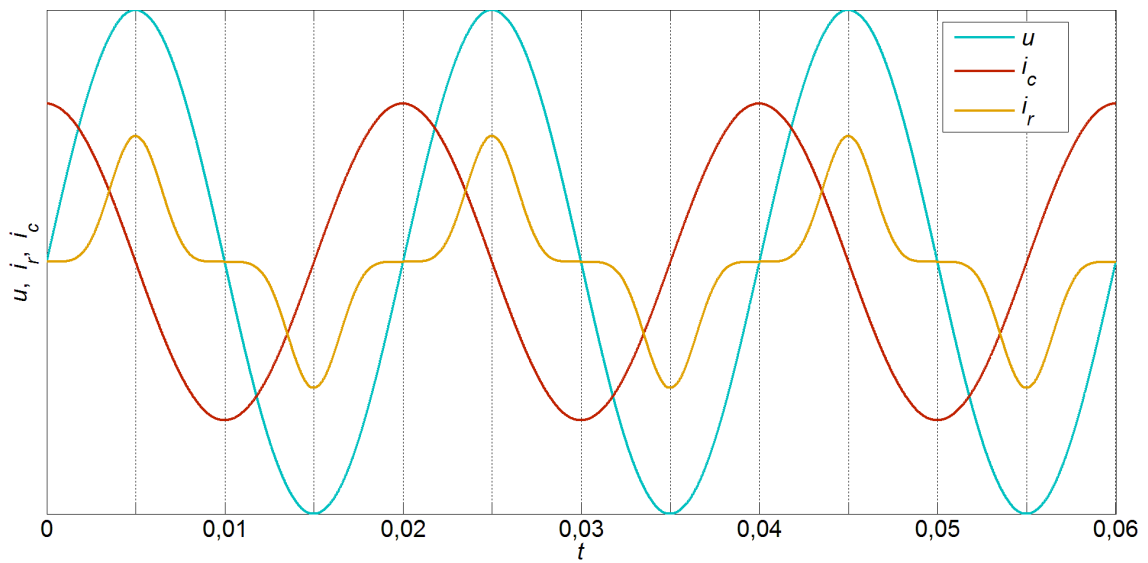
$$u_r = \left(1 + \frac{C}{C_s}\right) \cdot u - \frac{1}{C_s} \cdot \int_{t=0}^T i_t \cdot dt \quad (2.4.3)$$

$$i_t = C \cdot \frac{du}{dt} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_r}{U_{ref}}\right)^\alpha \quad (2.4.4)$$

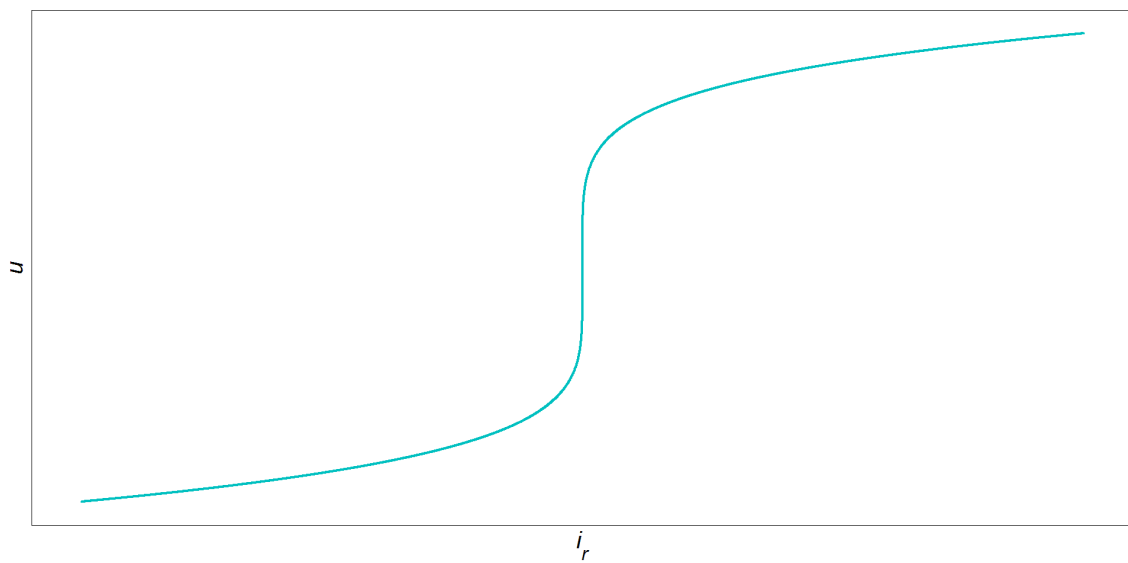
У изразима (2.4.3) и (2.4.4) су све величине као и за упрошћен модел, а C_s представља капацитивност којом се дефинише фазни померај између напона МОП-а и нелинеарне компоненте струје одвођења.

У случају коришћења упрошћеног модела, напајањем чисто простопериодичним напonom, таласни облици напона и струје одвођења су приказани на Сл. 2.4.6, а волт-амперска карактеристика на Сл. 2.4.7. У случају проширеног модела, таласни облици напона и струје су приказани на Сл. 2.4.8, а волт-амперска карактеристика на Сл. 2.4.9. Може се закључити да проширен

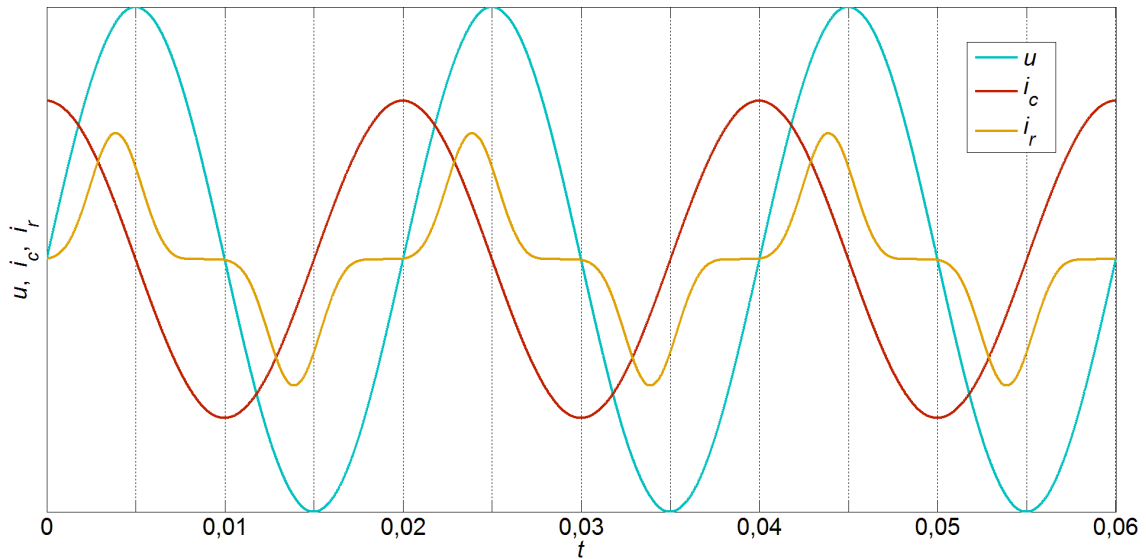
модел боље приказује одзив МОП-а и ближи је реалном случају који се добија у лабораторијским условима [15].



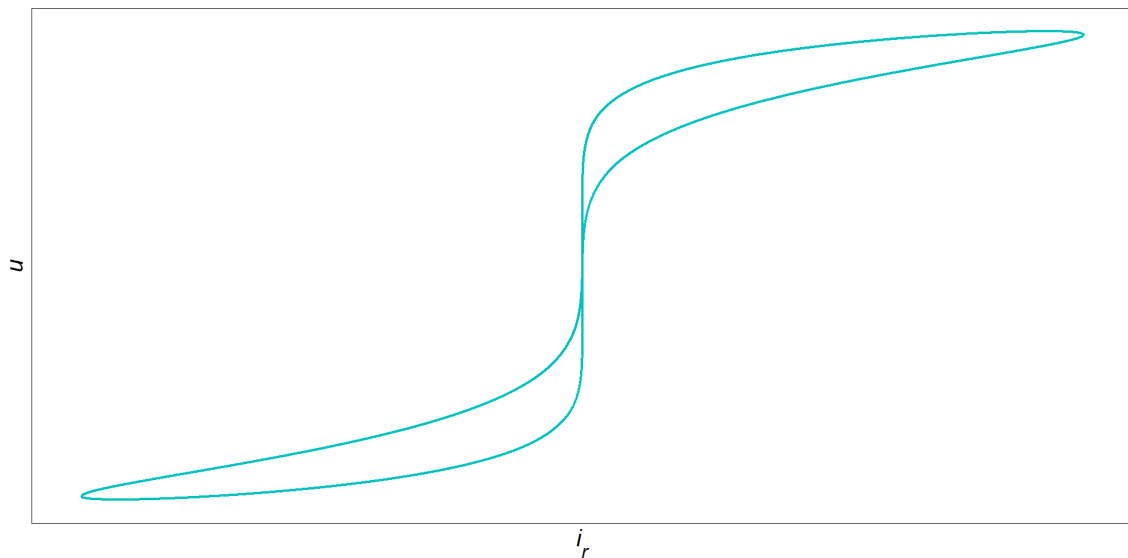
Сл. 2.4.6 Таласни облици напона и струја упрошћеног модела МОП-а



Сл. 2.4.7 Волт-амперска карактеристика упрошћеног модела МОП-а



Сл. 2.4.8 Таласни облици напона и струја проширеног модела МОП-а



Сл. 2.4.9 Волт-амперска карактеристика проширеног модела МОП-а

Поред стандардних параметара МОП-а који су моделовани упрошћеним и проширеним моделом, еквивалентне шеме МОП-а се могу додатно проширити уважавањем других параметара који су последица паразитних капацитивности и запрљаности површине одводника. Паразитне капацитивности се могу укључити у укупну капацитивност, а у случају велике запрљаности површине одводника могла би се додати паралелна грана са отпорником који би представљао грану са екстерном струјом одводника [51].

2.5. Утицај температуре на волт-амперску карактеристику и деградацију МОП-а

Температура има веома важну улогу приликом анализе рада МОП-а. С обзиром да представља један од најутицанијих фактора, бројни научно-истраживачки радови и бројне студије се баве искључиво утицајем температуре на карактеристике одводника пренапона. Тако постоје радови који се баве температурном стабилношћу и проценом преосталог животног века МОП-а [37], [39], [52], [53] и радови који анализирају термичке еквивалентне шеме МОП-а [54], [55], [56], [57], [58]. У овом потпоглављу је анализиран утицај температуре из два аспекта. Први аспект је појава термичког бега односно анализа динамичке стабилности рада МОП-а, док је други аспект директно везан за деградацију МОП-а услед трајног радног напона. Сагледавањем оба аспекта ове проблематике, може се проценити преостали животно век одводника пренапона.

Као што је већ више пута напоменуто у претходним поглављима, одводници пренапона су уређаји који су константно прикључени на фазни напон мреже. С обзиром да металоксидни одводници пренапона због изразите нелинеарности своје карактеристике немају искришта, услед трајног радног напона кроз активни део МОП-а стално протиче струја одвођења. Иако мала по својој јачини, ова струја ипак изазива Џулове губитке, тј. изазива загревање одводника. Струјно-напонска карактеристика МОП-а у области малих струја је изразито температурно зависна. Може се сматрати да вредност резистивне компоненте струје одвођења при неком напону има следећу температурну зависност:

$$I_r \sim e^{-W_c/kT} \quad (2.5.1)$$

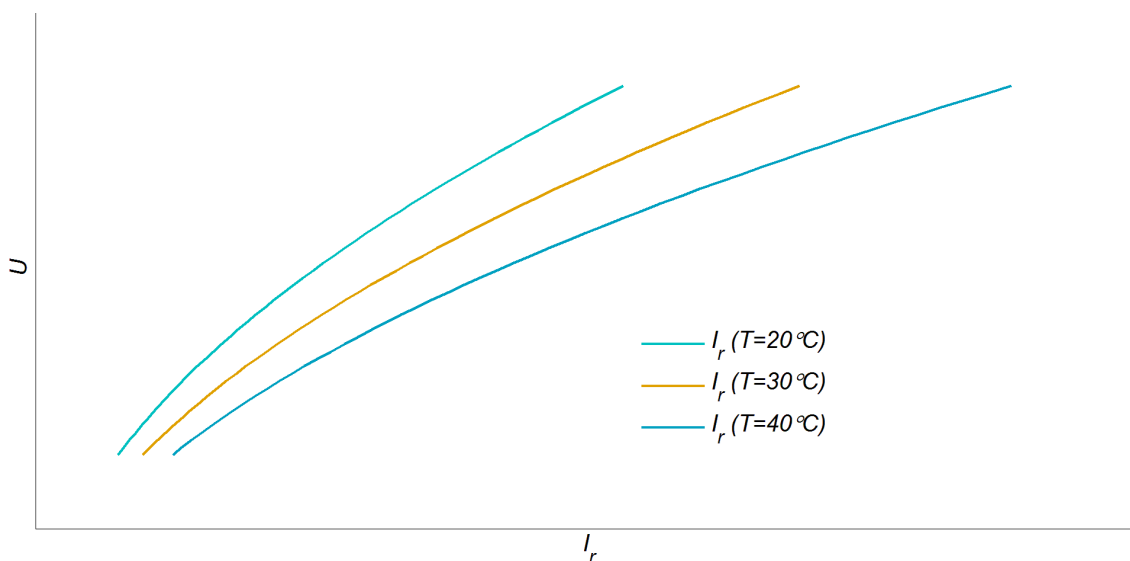
У изразу (2.5.1) струја I_r је резистивна струја одвођења при неком напону на температури T , W_c је активациона енергија провођења одводника (која је независна од напона), k је Болцманова константа ($k=0,86 \cdot 10^{-4}$ eV/K) и T је температура одводника у [K]. Треба напоменути да активациона енергија зависи од материјала, а за цинк-оксид се могу усвојити вредности у опсегу $W_c=0,2 \div 0,5$ eV.

Полазећи од израза (2.5.1), врло је једноставно одредити однос резистивних струја одвођења при истом напону на различитим температурама:

$$\frac{I_{r1}}{I_{r2}} = e^{\frac{-W_c}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2.5.2)$$

У изразу (2.5.2) су I_{r1} и I_{r2} резистивне струје одвођења на температурама T_1 и T_2 респективно. На Сл. 2.5.1 су приказане симулиране волт-амперске карактеристике МОП-а у области малих струја на три различите температуре МОП-а. На самој слици су температуре наведене у [°C], иако је у једначини (2.5.2) потребно вредности температуре унети у [K]. Овде је потребно напоменути да осе на Сл. 2.5.1 нису квантификоване из простог разлога што циљ није квантитативна анализа реалног одводника, него квалитативно објашњење наведених појава. Исто важи и за остале слике које ће бити приказане у овом потпоглављу.

Из једначина (2.5.1) и (2.5.2) се може закључити да је резистивна струја зависна од температуре са позитивним температурним коефицијентом, тј. резистивна струја одвођења и температура МОП-а образују позитивну повратну спрегу. Имајући ово у виду, загревање одводника доводи до повећања струје одвођења, а повећање струје одвођења доводи до додатног загревања. Иако на први поглед делује да је овај систем неодржив, показује се да се у случају умереног радног напона МОП-а ипак достиже температурни еквилибријум када се снага загревања МОП-а изједначи са снагом дисипације топлоте са површине МОП-а [37]. Међутим, у случају превеликог радног напона (већег од граничне вредности) није могуће достићи температурни еквилибријум и температура МОП-а се повећава све до његовог термичког уништења.



Сл. 2.5.1 Температурна зависност струјно-напонске карактеристике у области малих струја

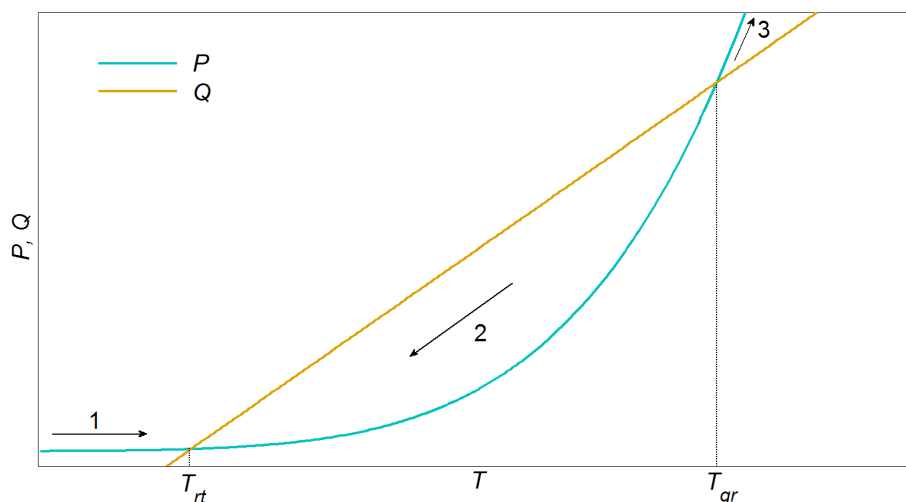
Протицањем струје одвођења при простопериодичном напону (U), за снагу генерисања топлоте у варистору (P) може се сматрати [37], [39]:

$$P \sim U \cdot e^{-W_c/kT} \quad (2.5.3)$$

Снага дисипације топлоте са површине варистора зависи од температуре варистора, амбијенталне температуре и димензија варистора, тј. може се сматрати да важи релација:

$$Q \sim (T - T_{amb}) \quad (2.5.4)$$

У изразу (2.5.4), Q је снага дисипације топлоте при температури T , T_{amb} је амбијентална температура. На Сл. 2.5.2 су приказане снаге генерисања и дисипације топлоте МОП-а према једначинама (2.5.3) и (2.5.4).



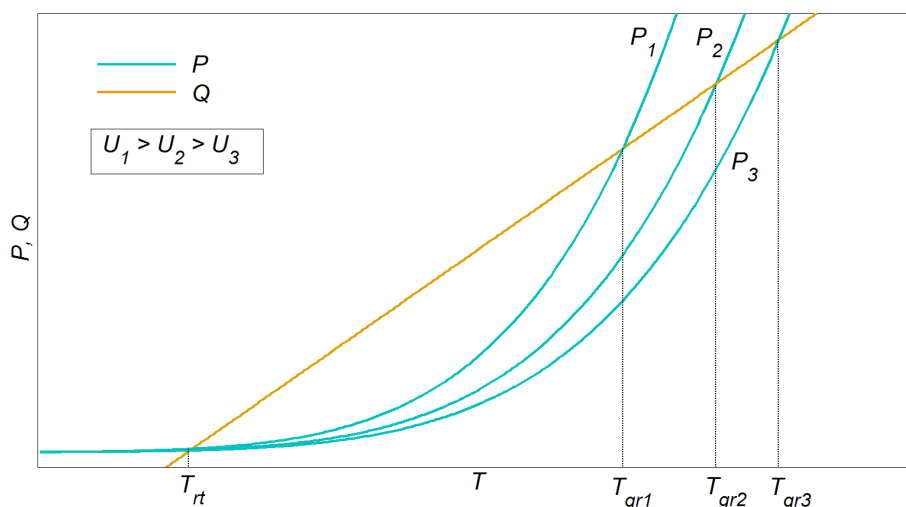
Сл. 2.5.2 Динамичка стабилност рада МОП-а

Температуре дефинисане на Сл. 2.5.2 представљају температуру радне тачке (T_{rt}) и температуру границе стабилности МОП-а (T_{gr}). Може се закључити да температура МОП-а у трајном раду може имати једну од ове две вредности јер су то једине тачке када је снага генерисања једнака снази дисипације топлоте. Међутим, трајни рад МОП-а је одржив само на температури радне тачке. Да би се ово објаснило, потребно је на Сл. 2.5.2 уочити три области: (1) област температура мањих од T_{rt} ; (2) област температура између T_{rt} и T_{gr} ; (3) област температура изнад T_{gr} . Ако се у прелазном процесу температура МОП-а налази у области 1, тада је снага генерисања већа од снаге дисипације и температура ће се повећавати све док не достигне вредност T_{rt} . Ако се температура МОП-а налази у области 2, тада је снага генерисања мања од снаге дисипације и температура ће се

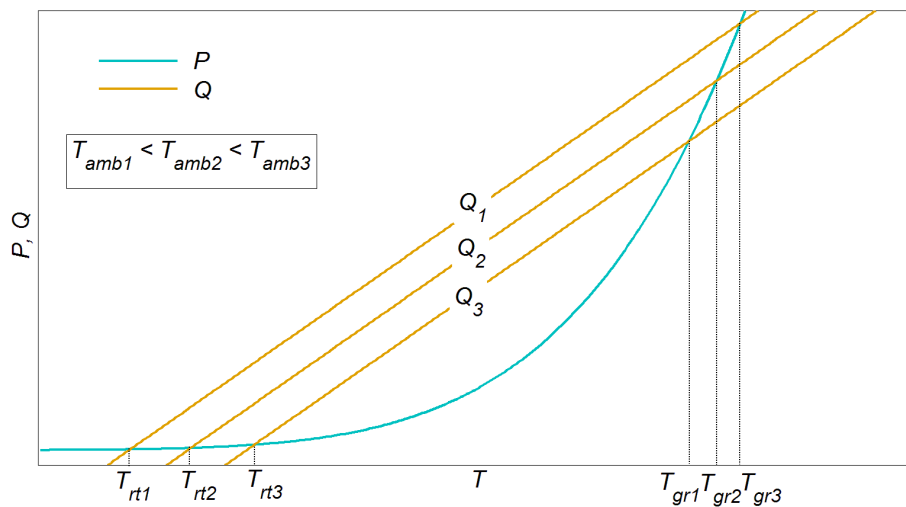
смањивати све док не достигне вредност T_{rt} . Међутим, ако се у прелазном процесу температура МОП-а нађе у области 3, тада је снага генерисања већа од снаге дисипације и температура ће се повећавати све до термичког уништења МОП-а. Ова појава се назива термички бег. Промене температуре у областима 1, 2 и 3 су приказане стрелицама на Сл. 2.5.2.

У случају наиласка пренапона, МОП почиње да проводи при чему се његова температура повећава. Уз претпоставку да је пре наиласка пренапона МОП био у стационарном стању, тј. да је његова температура била једнака T_{rt} , повећање температуре МОП-а услед прораде одводника мора бити мање од разлике температура T_{gr} и T_{rt} , тј. МОП мора остати у области 2. Претходна констатација представља услов динамичке стабилности МОП-а.

Постаје јасно да апсорпциона моћ одводника зависи од разлике температура T_{gr} и T_{rt} , тј. од величине области 2. Произвођачи декларишу апсорпциону способност одводника која износи око 200 J/cm^3 , међутим стварне вредности због маргине сигурности износе чак око $400\text{-}500 \text{ J/cm}^3$. Чак се показује да је већа апсорпциона моћ ако су веће ударне струје (реда 2000 J/cm^3) него када су струје реда неколико ампера мрежне учестаности [59]. Поред карактеристика материјала од кога су направљени варистори МОП-а, на апсорпциону моћ одводника утичу и вредност напона МОП-а и амбијентална температура. На Сл. 2.5.3 и Сл. 2.5.4 су приказане карактеристике генерисања и дисипације топлоте МОП-а у зависности од радног напона и амбијенталне температуре.



Сл. 2.5.3 Утицај напона на апсорпциону моћ МОП-а



Сл. 2.5.4 Утицај амбијенталне температуре на апсорпциону моћ МОП-а

Са Сл. 2.5.3 се може извести неколико закључака. Први закључак је да повећање напона утиче на смањење апсорпционе моћи одводника као последица смањења температуре границе стабилности. Други закључак је да повећање напона доминантно утиче на температуру границе стабилности МОП-а, док је утицај на температуру радне тачке практично занемарљив. Трећи закључак је да постоји гранична вредност напона (довољно велика) за коју се температура радне тачке и температура границе стабилности изједначују. Такво стање одводника пренапона је неодрживо, али се у пракси гранични напони не достижу у нормалном раду МОП-а.

Са Сл. 2.5.4 се такође може извести неколико закључака. Први закључак је да повећање амбијенталне температуре утиче на смањење апсорпционе моћи одводника. Други закључак је да повећање амбијенталне температуре утиче и на температуру радне тачке и на температуру границе стабилности. Тај утицај је већи код температуре радне тачке (чак и за мале промене амбијенталне температуре), док се за мале промене амбијенталне температуре може сматрати да се температура границе стабилности не мења.

Поред претходно спроведених анализа, које се тичу зависности волт-амперске карактеристике од температуре и повећања температуре услед провођења одводника при анализи динамичке стабилности МОП-а, свакако је потребно анализирати ефекат старења, тј. деградације МОП-а услед напрезања проузрокованих радним напонем мреже и услед струјних удара проузрокованих

провођењем одводника. За разлику од термичког бега, када се у случају стабилног рада МОП-а након хлађења температура враћа на почетну вредност, тј. волт-амперска карактеристика остаје непромењена, деградација је узрок трајне промене волт-амперске карактеристике, а самим тим и трајног повећања температуре радне тачке при истим амбијенталним условима [37]. Полазећи од вредности резистивне струје недеградираног (новог) одводника пренапона при неком напону, резистивна струја деградираног одводника при истом напону се може одредити из израза [37], [39]:

$$I_{rdeg}(t) = I_{r0} \cdot (1 + h \cdot \sqrt{t}) + \Delta I_r \quad (2.5.5)$$

У изразу (2.5.5) $I_{rdeg}(t)$ је вредност резистивне струје при неком напону у тренутку t (након деградације), I_{r0} је вредност резистивне струје у тренутку 0, ΔI_r промена резистивне струје одвођења као последица струјних удара, док h представља степен деградације који зависи од типа материјала и температуре одводника, а може се исказати као [37]:

$$h = H \cdot U^n \cdot e^{-W_d/kT} \quad (2.5.6)$$

У једначини (2.5.6) коефицијенти H и n зависе од типа материјала, а W_d је активациона енергија деградације (нешто већа од енергије W_c за исти тип одводника).

Полазећи од једначине (2.5.5) лако се може одредити однос резистивних струја деградираног и новог МОП-а:

$$\frac{I_{rdeg}(t)}{I_{r0}} = 1 + h \cdot \sqrt{t} + m \quad (2.5.7)$$

У једначини (2.5.7) m представља коефицијент деградације услед атмосферских пражњења. Овај коефицијент зависи од следећих фактора [39]:

1. густине струје пражњења;
2. таласног облика струје пражњења;
3. броја апсорбованих пренапона;
4. температуре одводника;
5. радног напона одводника.

На Сл. 2.5.5 је приказан процес деградације одводника, за неке усвојене коефицијенте који зависе од типа одводника (битна је само квалитативна

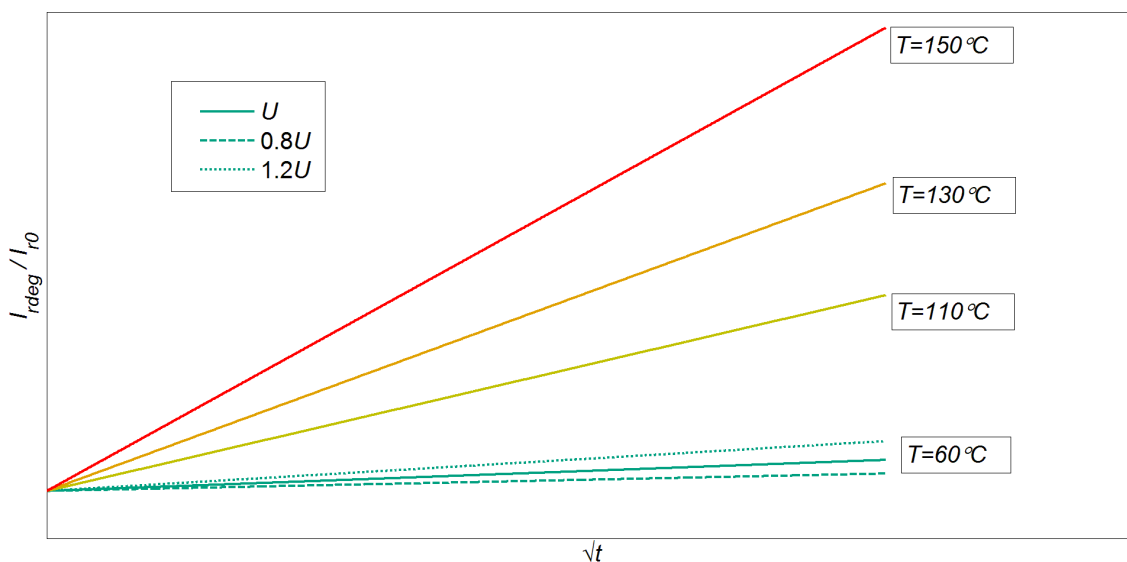
анализа), при различитим температурама одводника. На Сл. 2.5.6 је приказан ниво деградације МОП-а у случају прораде одводника у тренутку t_u .

Експериментална истраживања наведених ефеката деградације МОП-а су детаљно обрађена у радовима [37] и [39].

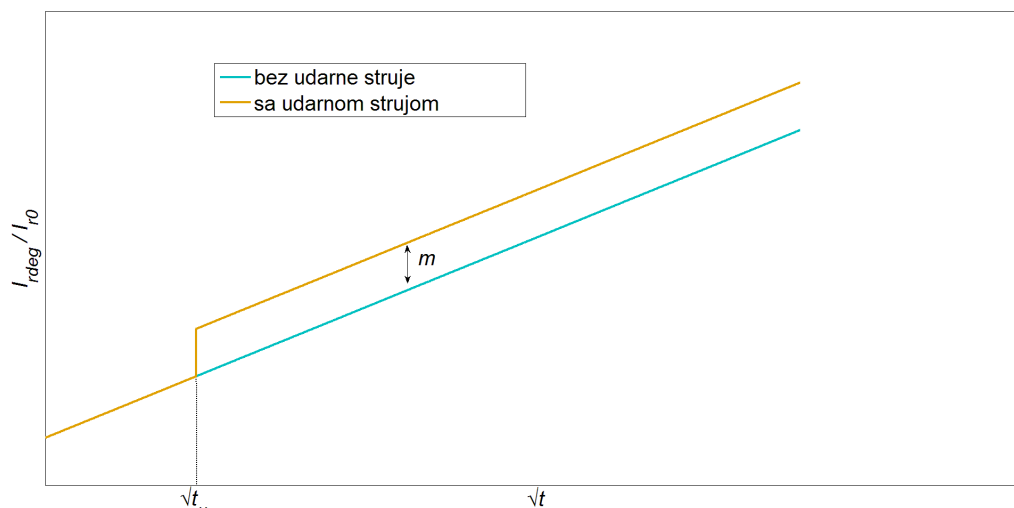
На основу претходних анализа, уважавајући једначине (2.5.1), (2.5.3) и (2.5.7), може се доћи до закључка да је однос снага генерисања топлоте деградираног и новог одводника:

$$\frac{P_{deg}(t)}{P_0} = 1 + h \cdot \sqrt{t} + m \quad (2.5.8)$$

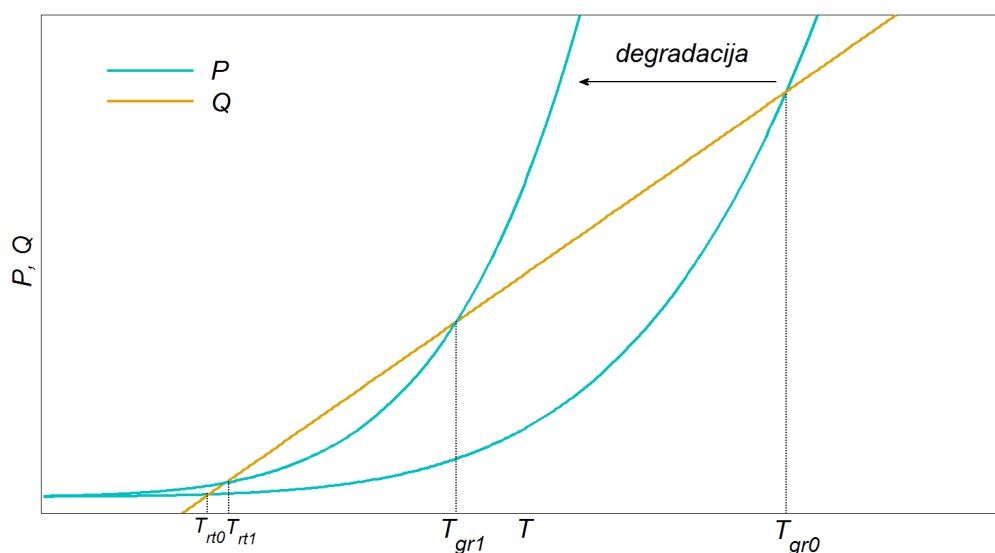
На Сл. 2.5.7 су приказане снаге генерисања топлоте новог и деградираног МОП-а. Може се закључити да се услед деградације радна температура МОП-а, при истом напону и истој амбијенталној температури, повећава. Ова чињеница се користи за реализацију неких метода за мониторинг и дијагностику МОП-а, о чему ће бити речи у наредном поглављу. Међутим, много је већи утицај на граничну температуру и апсорпциона моћ одводника се драстично смањује. Управо је ово разлог зашто долази до отказа деградираног МОП-а након наилаaska пренапона, јер он није у могућности да апсорбује енергију без уласка у област нестабилности рада.



Сл. 2.5.5 Утицај температуре на ниво деградације МОП-а



Сл. 2.5.6 Утицај ударне струје на ниво деградације МОП-а



Сл. 2.5.7 Утицај деградације МОП-а на додатно загревање

Овде је потребно напоменути да у случају атмосферских пренапона, због велике енергије се радна тачка не креће по истој кривој снаге генерисања топлоте, него се због тзв. привремене деградације ова крива мења у времену (прелази се са једне на другу (деградирану)), а после проласка пренапона се враћа у првобитно стање [53].

На основу свега реченог, може се за одређени одводник пренапона и дефинисану минималну потребну апсорпциону моћ одводника одредити преостали животни век за познате коефицијенте деградације. Процена животног века МОП-а као и процена апсорпционе моћи одводника су детаљније анализирани у радовима [37], [39], [53], [56].

На основу спроведених анализа може се доћи до закључка да се одводник пренапона може убрзано деградирати повећањем степена деградације дефинисаног једначином (2.5.6). С обзиром да степен деградације зависи од напона напајања одводника и температуре, повећањем било које од ове две величине долази се до повећања степена деградације. Тест убрзаног старења је дефинисан стандардом (IEC 99-4) и изводи се на температури од 115°C при напону који је 5% виши од трајног радног напона и то у трајању од 1000 сати. На овај начин се постиже ефекат оптерећења одводника трајним радним напонем током животног века од 110 година. Важно је напоменути да на степен деградације битно утиче и медијум у коме се налази одводник. Наиме, смањењем концентрације кисеоника брже долази до деградације МОП-а. Из тог разлога се убрзано старење може обављати и у N₂, CO₂, SF₆ или у уљу. Показује се да је старење убрзано у SF₆ и у уљу у односу на ваздух [53]. Убрзано старење у овим медијумима се може објаснити појавом електро-хемијских реакција у том случају. Чак се примећује да се у уљу дешава деградација и у одсуству напона на одводнику, тј. дешава се чиста хемијска деградација [53].

Поред тестова убрзаног старења који се обављају на варисторима, постоје и бројни други тестови који се обављају у процесу производње МОП-а. Један од најважнијих је свакако тест издржљивости (*duty cycle test*) који анализира могућност МОП-а да задржи стабилност рада и могућност враћања на радну температуру при трајном радном напону након низа унапред дефинисаних догађаја (струјних напрезања у одређеним временским интервалима). Потребно је напоменути да се по овом питању разликују захтеви које дефинишу различити стандарди (нпр. IEC и ANSI), а најзахтевнији по овом тесту је IEC стандард [58].

3. МЕТОДЕ ЗА МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКУ МОП-А

3.1. Уводна разматрања

Имајући у виду да су одводници пренапона током целог животног века изложени трајном радном напону мреже и да су изложени различитим атмосферским приликама (одводници који су монтирани споља), може се закључити да постоје бројни фактори који могу довести до скраћења животног века МОП-а. Неки од ових фактора, који су најчешће узроци скраћења животног века и отказа МОП-а су:

1. Деградација услед ударних струја;
2. Деградација услед трајног радног напона;
3. Деградација услед продора влаге унутар кућишта;
4. Деградација услед атмосферских услова;
5. Деградација услед хемијских реакција;
6. Деградација услед неравномерне расподеле напона.

Вероватноћа деградације услед неких од набројаних фактора је веома мала, док постоје студије које индицирају неке узроке отказа одводника који су чешћи, односно за које постоји већа вероватноћа дешавања [20], [21], [22]. Испитивањима одводника пренапона током 80-тих година, показано је да је велики број отказа одводника, чак у 85% случајева, последица продора влаге унутар кућишта [3]. Овај проблем је доминантан за одводнике који имају систем за заптивање одводника, а процедура производње МОП-а игра најважнију улогу у смањењу отказа изазваног продором влаге унутар кућишта. Нове процедуре производње са директним изливањем полимерног кућишта на активни део МОП-а практично елиминису могућност појаве влаге. С обзиром да су одводници константно прикључени на радни напон, изложени привременим пренапонима и апсорбују енергију ударних струја, електрично старење МОП-а је највероватнији узрок деградације данашњих одводника пренапона [5]. Ово старење је доминантно проузроковано ударним струјама, док се деградација услед трајног радног напона, која је постојала за одводнике старијих генерација, развојем технологије производње варистора практично елиминисе. Као узроци деградације и отказа

МОП-а који се повремено јављају могу се навести и смицање варистора услед неправилног транспорта, складиштења или монтаже и неравномерна расподела напона дуж одводника. Показано је да задрљање површине МОП-а може довести до израженије неравномерне расподеле напона дуж одводника која може проузроковати убрзано старење МОП-а [51].

Сваки од поменутих узрока деградације доводи до промене струје одвођења, тј. промене волт-амперске карактеристике, промене термичког профила МОП-а, а могу се јавити и парцијална пражњења у зависности од врсте деградације која се јавља. Због тога се могу издвојити три групе метода које се користе за мониторинг и дијагностику стања МОП-а. То су методе базиране на анализи струје одвођења при радном напону мреже, методе базиране на анализи термичке слике МОП-а и методе базиране на детекцији парцијалних пражњења. У оквиру сваке од ових група постоји већи број развијених метода за мониторинг и дијагностику МОП-а од којих су неке нашле ширу примену и имплементирани су у одређене уређаје за мониторинг, док су друге методе остале на нивоу академског значаја. У зависности од потребне мерне опреме и мерених величина могу се издвојити методе које су применљиве у погону (*online* методе) и методе које захтевају прекид погона и демонтажу одводника (и транспорт до лабораторије) (*offline* методе). С обзиром да су у односу на осталу електроенергетску опрему одводници пренапона релативно јефтине, поготово на средњем напону, потребно је пажљиво размотрити коју методу и у ком временском интервалу је потребно применити како вредност мониторинга не би превазишла цену самих одводника.

У циљу испитивања одводника пренапона који су били у погону, након демонтаже и отпремања одводника у лабораторију могу се извршити бројни *offline* тестови са циљем детектовања деградираних одводника. Неке од метода које се могу користити обухватају [60]:

1. Детекцију радио сметњи на учестаностима од 1 MHz;
2. Детекцију парцијалних пражњења која су последица короне;
3. Детекцију парцијалних пражњења на бази ултрасоничних снимања;
4. Детекцију широкопојасне емисије електромагнетских таласа;
5. Снимање струје одвођења при радном напону мреже;

6. Снимање референтног напона МОП-а;
7. Снимање волт-амперске карактеристике.

Парцијална пражњења на одводнику пренапона се могу јавити као последица влаге и других физичких и хемијских неправилности унутар МОП-а или као последица оштећења самог кућишта МОП-а. За детекцију парцијалних пражњења се могу користити методе базиране на снимању емитованих електромагнетских таласа на веома високој учестаности (VHF) у опсегу од 30 MHz – 300 MHz или применом UHF метода са детекцијом парцијалних пражњења у опсегу 750 MHz – 1500 MHz [4], [36], [60], [61]. Ове методе су погодније као *offline* анализе јер се у погону јављају сметње друге електроенергетске опреме. IEC стандард дефинише тачну процедуру приликом детекције парцијалних пражњења при којој детектована пражњења не смеју прећи вредност од 10 pC. Детекција радио сметњи такође представља једну од метода детектовања парцијалних пражњења.

Као што је дефинисано у поглављу 2.3, референтни напон је напон на одводнику при коме је струја одвођења једнака референтној струји која је дефинисана од стране произвођача (обично у опсегу од 1-10 mA). Референтна струја је на колону криве волт-амперске карактеристике и састављена је од релативно мале капацитивне и доста веће резистивне компоненте. У зависности од тога како је дефинисана референтна струја у односу на колону криве, деградација може изазвати повећање референтног напона, смањење референтног напона или референтни напон може остати непромењен. Због тога референтни напон није добар индикатор стања МОП-а [1].

Снимање волт-амперске карактеристике од 50% вредности радног напона па све до референтног напона је најбољи показатељ стања МОП-а. Међутим и ова метода је ограничена на *offline* примену [1]. Снимање у погону би захтевало скупу мерну опрему, синхронизовано мерење и компензацију капацитивне компоненте струје одвођења. Методе компензације су детаљно обрађене у поглављу 3.5.

Што се тиче *online* метода, мониторинг МОП-а се обично спроводи мерењем и анализом струје одвођења или обрадом термичке слике МОП-а. Такође, постоје и методе које подразумевају комбиновану анализу и струје одвођења и температурне разлике одводника пренапона [62]. Међутим, не постоји

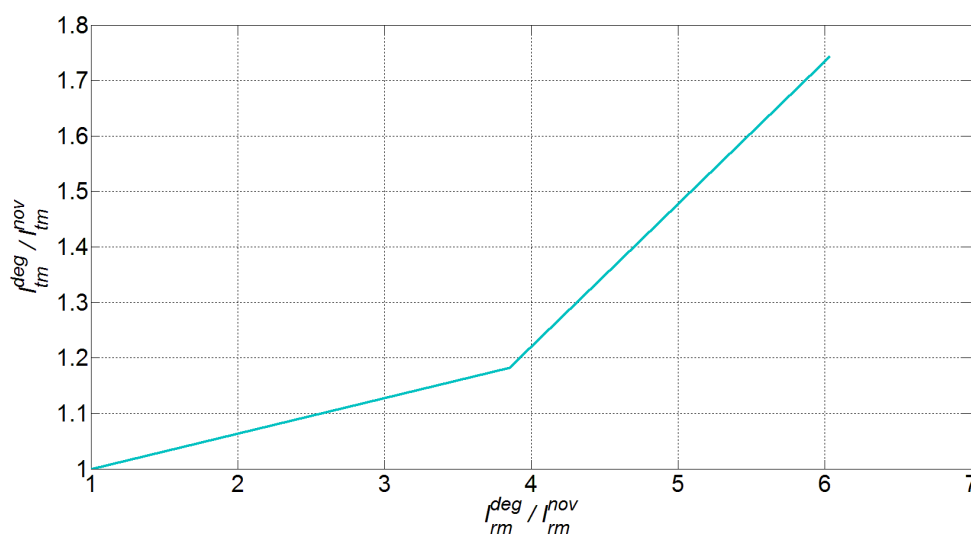
дефинисана процедура за извођење ових мерења и анализу добијених података [20].

Стандардне методе мониторинга на бази мерења температуре се базирају на примени различитих температурних сензора, термовизијских и инфрацрвених камера као и система за детектовање површинских акустичних таласа који не захтевају никакво напајање нити хардверску везу са сензорима [1], [61], [63]. Ове методе се сусрећу са великим бројем потешкоћа и неодређености које су последица утицаја атмосферских прилика, радног напона, недовољно прецизног термичког модела МОП-а и сл. Показује се да на температуру одводника додатно утичу загревање због струје одвођења, топлотни капацитет варистора, термичка отпорност између варистора и кућишта, топлотни капацитет кућишта, термичка отпорност између кућишта и амбијента, соларна радијација и ветар. Ветар смањује термичку отпорност између кућишта и амбијента за чак 90% до брзина ветра од 10 km/h [55]. Додатни проблеми се могу јавити у случају употребе електронских термометара базираних на термопаровима који су веома осетљиви на јако електромагнетско поље. У новије време се у ову сврху користе фиброоптички термометри који имају малу тежину, велику флексибилност, велику раздаљину преноса, малу реактивност материјала, добру електричну изолацију и имуност на електромагнетско поље. Код анализе резултата и достизања стационарног температурног стања МОП-а потребно је водити рачуна и да се варистори брже загревају и брже хладе од самог кућишта, поготово варистори на самом врху одводника.

Тренутно се савремене методе мониторинга МОП-а доминантно базирају на декомпозицији укупне струје одвођења на њену капацитивну и резистивну компоненту и на хармонијској анализи тих компоненти или на хармонијској анализи укупне струје одвођења [22], [64]. Међутим, ове методе се сусрећу са одређеним финансијским, техничким и практичним ограничењима па се ретке од њих могу користити као методе мониторинга у погону. Хармонијска дисторзија и амплитуда струје одвођења, поготово њене резистивне компоненте, су веома битни показатељи стања МОП-а.

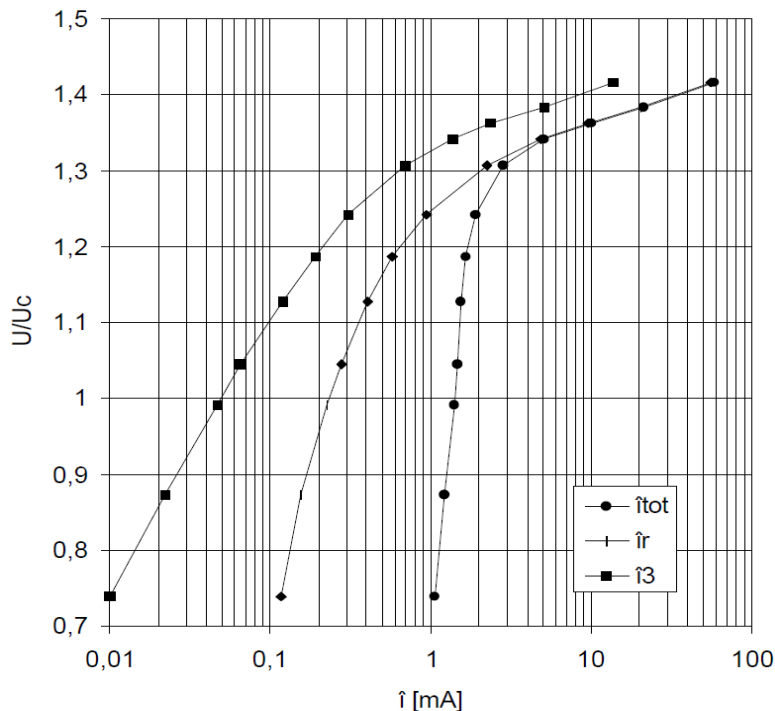
Хармонијска анализа струје одвођења, често коришћена метода за мониторинг МОП-а, носи висок ризик од погрешне интерпретације и грешака

мерења [5]. Што се тиче мониторинга на бази анализе струје одвођења, познато је да је од интереса анализирати резистивну компоненту која се доминантно мења старењем одводника, док капацитивна компонента остаје практично непромењена. С обзиром да је резистивна компонента за ред величине мања од капацитивне при радном напону, деградацијом МОП-а се вршна вредност струје одвођења практично не мења па се тешко може користити као индикатор стања. На Сл. 3.1.1 је приказана очекивана промена вршне вредности укупне струје и резистивне струје одвођења приликом деградације МОП-а. Са Сл. 3.1.1 се може закључити да је вршна вредност резистивне компоненте много бољи показатељ стања МОП-а од вршне вредности укупне струје. Међутим, мерење резистивне струје је повезано са низом проблема па се као алтернативно решење најчешће користи мерење трећег хармоника укупне струје МОП-а као индиректне мере резистивне струје. Због своје једноставности, метода 3. хармоника укупне струје одвођења се веома често примењује.



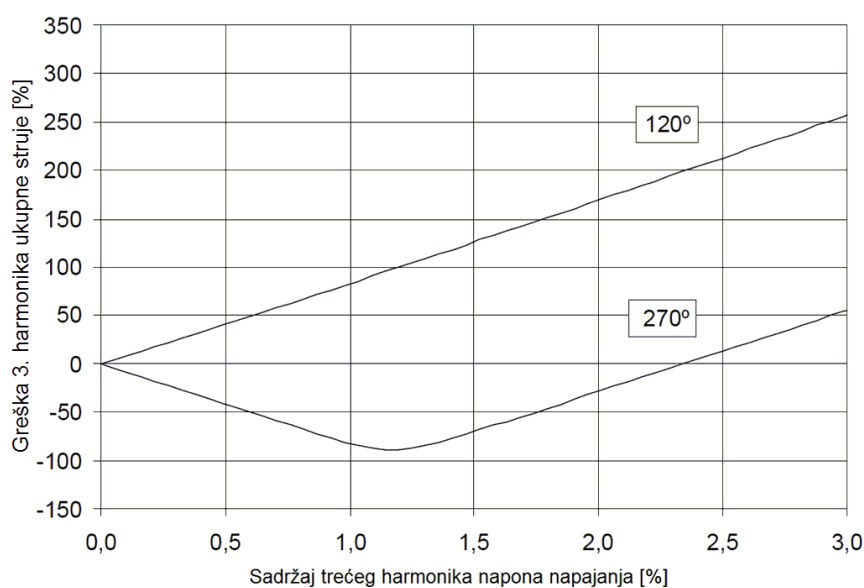
Сл. 3.1.1 Релативно повећање укупне струје одвођења у зависности од релативног повећања резистивне компоненте струје одвођења (симулације) [5]

Разлог због кога је могуће користити 3. хармоник укупне струје као индикатор је приказан на Сл. 3.1.2. Наиме, 3. хармоник укупне струје је сразмеран резистивној компоненти струје и има веома сличан облик волт-амперске карактеристике.



Сл. 3.1.2 Волт-амперска карактеристика укупне струје, њене резистивне компоненте и 3. хармоника укупне струје [5]

Иако 3. хармоник укупне струје делује као идеални показатељ стања МОП-а, потребно је размотрити чињенице да је струја 3. хармоника веома мала и тешко ју је прецизно одредити, а што је још важније, ова струја зависи од напона и температуре МОП-а. Чак и у случају да постоји и мерење радног напона и даље је тешко проценити температуру МОП-а на коју утичу амбијентална температура, Цулови губици, зрачење сунца и ветар. Дакле, може се закључити да 3. хармоник укупне струје одвођења није поуздан индикатор стања јер је много осетљивији на друге спољне факторе него на саму промену стања МОП-а. Овом закључку у великој мери доприноси и чињеница да појава хармоника у радном напону уноси додатне, ако не и највеће несигурности у одређивању стања МОП-а применом 3. хармоника струје одвођења. Овај проблем добија још више на значају знајући да је фазни став хармоника напона случајна променљива, па се хармоници струје проузроковани напона могу било додати било одузети од хармоника који су последица нелинеарности МОП-а. Екстремни случајеви грешака услед 3. хармоника напона се јављају при фазном ставу хармоника напона од 120° и 270° што је приказано на Сл. 3.1.3. Такође, у зависности од врсте деградације, 3. хармоник укупне струје одвођења може бити веома лош показатељ стања [65].



Сл. 3.1.3 Могући опсег грешака анализе 3. хармоника укупне струје за различите амплитуде и фазне ставове 3. хармоника напона [5]

Неке од најзначајнијих метода за мониторинг МОП-а на бази анализе струје одвођења, датих у литератури, су описане у овој дисертацији. То су:

1. Метода хармонијске анализе;
2. Метода директног читавања резистивне компоненте струје одвођења;
3. Метода губитака активне снаге;
4. Метода компензације капацитивне компоненте струје одвођења;
5. Метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења;
6. Метода основног хармоника резистивне компоненте струје одвођења;
7. Итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје одвођења.

3.2. Метода хармонијске анализе

Због нелинеарне карактеристике МОП-а, укупна струја одвођења садржи више хармонике чак и када је радни напон простопериодичан. Ниво виших хармоника у укупној струји при истом радном напону зависи од степена нелинеарности одводника. С обзиром да степен нелинеарности МОП-а зависи од његовог стања (што је одводник више деградиран то је његова нелинеарност слабије изражена), присуство виших хармоника у укупној струји одвођења се може користити као индикатор стања МОП-а.

Полазећи од Фуријеове трансформације, радни напон и укупна струја одвођења се могу представити следећим једначинама:

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \cdot \sin(k\omega t + \theta_k) \quad (3.2.1)$$

$$i_t = I_{t0} + \sum_{k=1}^n I_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (3.2.2)$$

У једначинама (3.2.1) и (3.2.2) су: u – временска промена радног напона МОП-а, U_0 – једносмерна компонента радног напона МОП-а, U_k – амплитуда k -тог хармоника напона, i_t – временска промена укупне струје одвођења, I_{t0} – једносмерна компонента укупне струје одвођења, I_k – амплитуда k -тог хармоника укупне струје, θ_k – фазни став k -тог хармоника напона, φ_k – фазни став k -тог хармоника укупне струје.

Развојем сигнала укупне струје одвођења у Фуријеов ред (једначина (3.2.2)), могу се прецизно одредити амплитуде виших хармоника укупне струје. У случају простопериодичног напајања одводника, ти виши хармоници одговарају вишим хармоницима резистивне компоненте и директни су показатељи стања МОП-а за исти радни напон. Међутим, у случају појаве виших хармоника напона, хармоници укупне струје су последица како нелинеарности МОП-а, тако и постојања виших хармоника капацитивне и резистивне компоненте струје који су последица хармоника напона. У том случају је потребно одредити само хармонике резистивне компоненте струје да би се добили адекватни показатељи стања МОП-а.

Уважавајући упрошћен модел МОП-а (Сл. 2.4.4), укупна струја се може представити збиром капацитивне и резистивне компоненте. Уважавајући

чињеницу да су виши хармоници резистивне компоненте струје у фази са одговарајућим вишим хармоничима радног напона (према упрошћеном моделу) и да виши хармоници капацитивне компоненте струје предњаче одговарајућим вишим хармоничима радног напона за $\pi/2k$, укупна струја одвођења се може представити следећом једначином:

$$i_t = I_{t0} + \sum_{k=1}^n I_{ck} \cdot \cos(k\omega t + \theta_k) + \sum_{k=1}^n I_{rk} \cdot \sin(k\omega t + \theta_k) \quad (3.2.3)$$

Осим претходно дефинисаних величина, у једначини (3.2.3) су I_{ck} – амплитуда k -тог хармоника капацитивне компоненте, I_{rk} – амплитуда k -тог хармоника резистивне компоненте струје одвођења.

Множењем једначина (3.2.2) и (3.2.3) са $\sin(k\omega t + \theta_k)$, коначно се добија једначина која дефинише хармонијске компоненте резистивне струје одвођења [6]:

$$I_{rk} = I_k \cdot (\cos(\theta_k) \cos(\varphi_k) + \sin(\theta_k) \sin(\varphi_k)) \quad (3.2.4)$$

Једначином (3.2.4) се постиже одређивање само резистивног дела виших хармоника струје, који у случају појаве виших хармоника напона представљају боље индикаторе него хармоници укупне струје из већ поменутих разлога. Међутим, као што је већ напоменуто, једначина (3.2.4) подразумева да су фазни ставови хармоника напона и резистивне компоненте струје одвођења једнаки. У реалном случају то није задовољено па самим тим и примена ове методе хармонијске анализе доводи до грешке. Још један недостатак ове методе се огледа у томе да се једначином (3.2.4) одређују укупни хармоници резистивне компоненте, а већ је напоменуто да се ти хармоници јављају и као последица нелинеарности МОП-а и као последица виших хармоника напона. Дакле, требало би раздвојити ове две компоненте и користити као индикаторе само хармонике који су последица нелинеарности МОП-а, а то овом методом није могуће урадити.

Поред недостатака самих метода хармонијске анализе, постоје и недостаци хармоника струје као индикатора стања МОП-а. Њихов недостатак је тај што ниво хармоника струје зависи како од нелинеарне карактеристике МОП-а (стања МОП-а), тако и од амплитуде и фазног става виших хармоника у напону. Самим тим, индикатори варирају не само са стањем МОП-а него и са приликама у мрежи што смањује њихову поузданост као показатеља стања.

3.3. Метода директног читавања резистивне компоненте струје одвођења

Директно читавање резистивне компоненте струје одвођења представља најједноставнију методу за мониторинг и дијагностику МОП-а. Уз увођење одређених претпоставки, максимална вредност резистивне компоненте струје се директно читава са снимљеног таласног облика укупне струје одвођења. Један од начина извођења ове методе представља читавање вредности укупне струје одвођења у тренутку у којем је први извод радног напона у времену једнак нули ($du/dt=0$):

$$I_{rm} = i_r \left(t_0 \left| \frac{du}{dt} \right|_{t=t_0} = 0 \right) \quad (3.3.1)$$

У једначини (3.3.1) су I_{rm} – максимална вредност резистивне компоненте струје, i_r – тренутна вредност резистивне компоненте струје, t_0 – временски тренутак у којем је $du/dt=0$.

Недостаци ове методе се огледају у грешци која се јавља у случају постојања виших хармоника напона, као и у томе што је потребно симултано мерење радног напона и струје одвођења.

Други начин, тзв. *POW (Point on Wave)* метода, се реализује на сличан начин, уз увођење одређених прорачуна на основу којих се одређује резистивна компонента струје [6]. Полазећи од претпоставке да је $u=\sin(\omega t)$, резистивна компонента струје и напон су симетрични у односу на угаону учестаност $\omega t=\pi/2$. Дакле, ако су две тачке на таласном облику напона које одговарају тренуцима ωt_1 и ωt_2 симетричне у односу $\pi/2$, оне имају једнаке амплитуде напона и једнаке изводе са обрнутим предзнаком:

$$u(t_1) = u(t_2), \quad C \cdot \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_1} = -C \cdot \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_2} \quad (3.3.2)$$

У једначини (3.3.2) је C капацитивност упрошћеног модела МОП-а.

Такође су једнаке и одговарајуће резистивне компоненте струје одвођења, а капацитивне компоненте имају исте амплитуде али супротан предзнак:

$$i_r(t_1) = i_r(t_2), \quad i_c(t_1) = -i_c(t_2) \quad (3.3.3)$$

Анализирајући једначине (3.3.2) и (3.3.3), долази се до закључка да се лако може одредити резистивна компонента струје у тренуцима t_1 и t_2 :

$$i_r(t_1) = i_r(t_2) = \frac{(i_t(t_1) + i_t(t_2))}{2} \quad (3.3.4)$$

Предност *POW* методе се огледа у томе што није потребно мерење напона, али као и претходна метода директног одређивања резистивне компоненте струје и ова метода прави грешку у случају постојања виших хармоника напона.

Као и у случају методе хармонијске анализе, и резистивна струја (максимална или нека тренутна вредност) зависи како од стања МОП-а, тако и од амплитуде радног напона и садржаја виших хармоника у напону. Дакле, резистивна струја као показатељ стања има одређене несигурности јер варира са условима напајања, а не само са стањем МОП-а. Ово додатно добија на значају ако не постоје мерења напона.

3.4. Метода губитака активне снаге

Метода губитака активне снаге огледа се у мерењу и напона одводника и струје одвођења на основу којих се срачунавају губици активне снаге у одводнику [66]. Због потребе за синхроним мерењем радног напона МОП-а ова метода се широко примењује у лабораторији (*off-site*), а ретко у погону (*on-site*). Метода губитака активне снаге користи чињеницу да су губици активне снаге директно повезани са јачином резистивне компоненте струје одвођења која услед ових губитака загрева одводник. Губици активне снаге МОП-а се нумерички могу израчунати на следећи начин:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) \cdot i_t(t) \cdot dt \quad (3.4.1)$$

У једначини (3.4.1) су: P – снага активних губитака у одводнику, T – основна периода сигнала, $u(t)$ – тренутна вредност напона одводника, $i_t(t)$ – тренутна вредност укупне струје одвођења.

Велика предност ове методе се огледа у томе што је метода неосетљива на хармонике радног напона, тј. даје тачне резултате и у несинусоидалним условима напајања [1]. Основни недостатак ове методе је обавезно мерење напона одводника, које у погонским условима или није могуће или је везано са одређеним проблемима и ризицима приступа напонским трансформаторима.

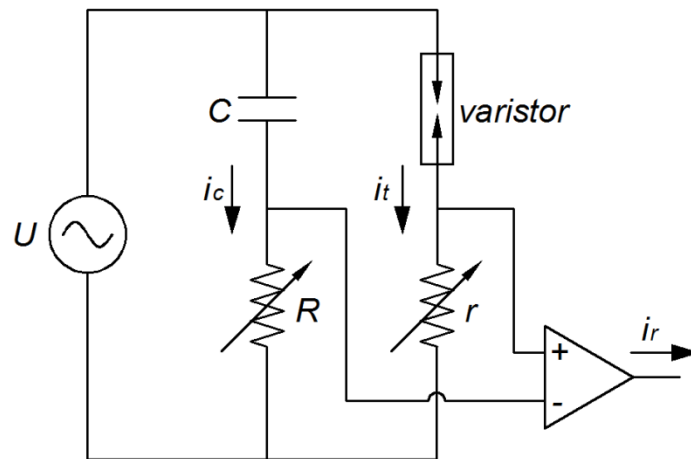
Као и у случају претходно описаних метода (хармонијске анализе и директног одређивања резистивне струје) и у овом случају показатељ одређен једначином (3.4.1) варира не само са стањем МОП-а него и са условима напајања МОП-а.

3.5. Метода компензације капацитивне компоненте струје одвођења

Методе компензације капацитивне компоненте струје одвођења су методе које су детаљно анализирани у бројним научно-истраживачким радовима [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Ове методе се базирају на манипулацијама над измереним сигнаlima радног напона и струје одвођења. Тим манипулацијама се елиминише (компензује) капацитивна компонента из укупне струје одвођења МОП-а. На тај начин се као резултат добија резистивна компонента струје одвођења која у овом случају представља индикатор стања МОП-а. Примене метода компензације подразумевају да је МОП моделован упрошћеном еквивалентном шемом.

Идеја о компензацији капацитивне компоненте струје одвођења се први пут јавила 1987. Године [7], [8]. Развијен је уређај за директно мерење резистивне компоненте струје одвођења применом диференцијалног појачавача. Принциписка шема уређаја је приказана на Сл. 3.5.1.

Применом уређаја са Сл. 3.5.1 компензација се постиже подешавањем отпорника R и r све док излазни сигнал (струја i_r) не буде у фази са улазним сигналом (напоном U) [9]. Проблем код овог уређаја се јавља у случају постојања виших хармоника у радном напону мреже када уређај не даје добре резултате. Постоје и рачунарске варијанте овог уређаја чиме се избегава потреба за хардверском реализацијом кола приказаног на Сл. 3.5.1 [9].



Сл. 3.5.1 Принципска шема уређаја за директно мерење резистивне компоненте струје одвођења

Метода компензације (*CCCM - Capacitive Current Compensation Method*) се математички заснива на принципу ортогоналности између капацитивне и резистивне компоненте струје одвођења. Ортогоналност капацитивне и резистивне струје се може лако доказати пратећи следеће једначине [6]:

$$A = \int_0^T i_c \cdot i_r \cdot dt \quad (3.5.1)$$

$$A = \int_0^T C \cdot \frac{du}{dt} \cdot f(u(t)) \cdot dt \quad (3.5.2)$$

$$A = \int_{u(0)}^{u(T)} C \cdot f(u(t)) \cdot du \quad (3.5.3)$$

У претходним једначинама су: i_c - капацитивна компонента струје одвођења, i_r - резистивна компонента струје одвођења, C - капацитивност упрошћене еквивалентне шеме МОП-а, $f(u)$ - функција којом је дефинисана нелинеарна зависност резистивне струје од радног напона МОП-а.

Уважавајући да је $u(T)=u(0)=U$, добија се:

$$A = \int_U^U C \cdot f(u(t)) \cdot du = 0 \quad (3.5.4)$$

Једначинама (3.5.1)-(3.5.4) је доказана ортогоналност капацитивне и резистивне компоненте струје одвођења. Практична примена *CCCM* методе се математички може реализовати подешавањем параметра G тако да важи релација [10]:

$$\int_0^{2\pi} u_{sf} \cdot (i_t - G \cdot u_{sf}) \cdot d\omega t = 0 \quad (3.5.5)$$

У претходној једначини је u_{sf} - радни напон померен унапред (*shifted forward*) за 90° . Тада се резистивна компонента струје може одредити из израза:

$$i_r = i_t - G \cdot u_{sf} \quad (3.5.6)$$

Ова метода компензације се једноставно користи, али њен недостатак се огледа у томе што није у могућности да уважи постојање виших хармоника напона. Да би се омогућило уважавање виших хармоника напона потребно је унапредити компензациону методу [11]. Тада се за основне хармонике напона и струја добија следећи израз:

$$\int_0^{2\pi} u_{sf1} \cdot (i_{t1} - G_1 \cdot u_{sf1}) \cdot d\omega t = 0 \quad (3.5.7)$$

У претходном изразу су све величине дефинисане као и у изразу (3.5.5), са тим што се индексом 1 означава да су у питању само основни хармоници сигнала. Када се подешавањем одреди компензациони коефицијент G_1 , имајући у виду да се капацитивност МОП-а не мења, могу се одредити компензациони коефицијенти за све више хармонике $G_n = nG_1$. Уважавајући претходне изразе, резистивна компонента струје закључно са постојањем n -тог хармоника се може одредити из једначине:

$$i_r = \sum_{k=1}^n (i_{tk} - k \cdot G_1 \cdot u_{sfk}) \quad (3.5.8)$$

Практична примена претходне методе се може лакше сагледати кроз анализу методе компензације са променљивим коефицијентима (*VCC – Variable Coefficient Compensation*) [67], [68]. Применом променљивих коефицијената омогућава се компензација капацитивног дела струје одвођења за сваки хармоник који се јавља у напону:

$$i_r = i_t - \frac{I_{t1} \cdot \sin(\varphi_1)}{U_1} \cdot \sum_{k=1}^n k \cdot U_k \cdot \cos(k\omega t + \theta_k) \quad (3.5.9)$$

У изразу (3.5.9) су: I_{t1} - амплитуда основног хармоника укупне струје одвођења, U_1 , U_k - амплитуда основног и k -тог хармоника радног напона респективно, φ_1 – фазни померај између основних хармоника напона и укупне струје, θ_k – фазни став k -тог хармоника напона.

Још једна метода се јавља као унапређење компензационе методе. У питању је метода ортогоналности струја (*COM - Current Orthogonality Method*) [6]. Применом ове методе могуће је одредити капацитивност МОП-а, а самим тим и таласни облик резистивне компоненте струје одвођења. Ова метода се може применити полазећи од једначине:

$$i'_c = \frac{du}{dt} = \frac{i_c}{C} \quad (3.5.10)$$

$$B = \int_0^T i'_c \cdot i \cdot dt \quad (3.5.11)$$

$$B = \int_0^T i'_c \cdot (i_r + C \cdot i'_c) \cdot dt = C \cdot \int_0^T i'^2_c \cdot dt \quad (3.5.12)$$

$$C = \frac{\int_0^T i'_c \cdot i \cdot dt}{\int_0^T i'^2_c \cdot dt} \quad (3.5.13)$$

Струја i'_c представља први извод сигнала радног напона и на основу њега се може одредити. Када се применом измерених вредности напона и струје одреди капацитивност МОП-а, резистивна компонента струје се може одредити применом следеће релације:

$$i_r = i - C \cdot i'_c \quad (3.5.14)$$

Метода ортогоналности струја показује боље перформансе у присуству виших хармоника напона од осталих метода компензације, а као додатну вредност има и прорачунату капацитивност еквивалентне шеме МОП-а.

Осим горе поменутих варијанти метода компензације, постоје и различите методе компензације које се могу реализовати применом виртуелно генерисаних сигнала капацитивне компоненте струје одвођења. Међутим, у том случају се не уважавају виши хармоници напона па се праве велике грешке у случају мониторинга МОП-а у погону. Једна од тих метода је метода померања струја (*SCM - Shifted Current Method*) [12]. Реализација ове методе је потпуно заснована на обради сигнала укупне струје одвођења и није потребно вршити мерење радног напона. *SCM* и сличне методе се заснивају на одређивању максималне вредности капацитивне компоненте струје након чега се рачунарски формира синусоида која се сматра капацитивном компонентом струје. Та синусоида се итеративно транслира и одузима од измерене укупне струје, све док основни хармоник разлика струја не буде фазно померен за четвртину периоде од генерисане

капацитивне компоненте. Тада се сматра да је разлика измерене укупне струје одвођења и формиране капацитивне компоненте једнака резистивној компоненти.

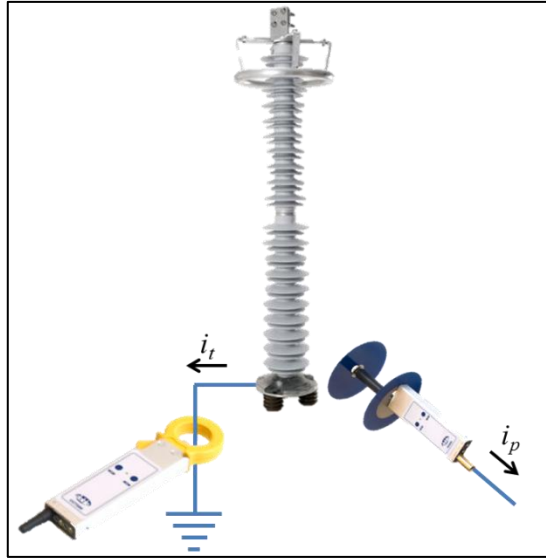
С обзиром да је резултат компензације капацитивне компоненте резистивна компонента струје одвођења, као показатељ стања МОП-а се може користити било који индикатор који се може накнадно одредити на основу резистивне струје (максимална вредност, ефективна вредност и амплитуде виших хармоника резистивне компоненте).

3.6. Метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења

Метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења представља једну од метода за мониторинг и дијагностику металоксидних одводника пренапона која се често помиње у литератури и која је такође пронашла и практичну примену кроз неколико уређаја за мониторинг и дијагностику МОП-а [13]. Ова метода се према неким ауторима такође може сврстати у методе компензације капацитивне компоненте струје. Међутим, она се не заснива на принципу ортогоналности него се компензација врши коришћењем додатних мерних уређаја.

Да би се метода директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте могла применити, потребно је извршити мерење укупне струје одвођења при радном напону мреже (i_t) и мерење индуковане струје у капацитивној сонди (i_p) постављеној као на Сл. 3.6.1.

Повољни ефекти ове методе се базирају на чињеници да није потребно мерење напона и да се приликом мерења користи капацитивна сонда која омогућава компензацију (елиминисање) хармонијских компоненти капацитивне струје одвођења које су последица постојања виших хармоника у радном напону мреже.



Сл. 3.6.1 Приказ мерења приликом директног одређивања трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења

Трећи хармоник радног напона мреже проузрокује појаву троструког трећег хармоника капацитивне компоненте струје одвођења. Имајући у виду малу вредност резистивне компоненте струје одвођења при радном напону мреже (за ред величине мања од капацитивне компоненте), а самим тим и малу вредност трећег хармоника резистивне компоненте струје одвођења, трећи хармоник капацитивне компоненте има велики утицај на укупну струју одвођења. Међутим, применом ове методе се може извршити компензација трећег хармоника капацитивне компоненте и директно одредити трећи хармоник резистивне компоненте струје одвођења.

За примену методе директног одређивања 3. хармоника резистивне компоненте потребно је претпоставити да је одводник пренапона моделован упрошћеном еквивалентном шемом, те да важе једначине:

$$i_r = i_t - i_c \quad (3.6.1)$$

$$I_{r3} = I_{t3} - I_{c3} \quad (3.6.2)$$

У једначинама (3.6.1) и (3.6.2) су: i_r – резистивна компонента струје одвођења, i_t – укупна струја одвођења, i_c – капацитивна компонента струје одвођења, I_{r3} , I_{t3} , I_{c3} – 3. хармоници резистивне, укупне и капацитивне струје одвођења респективно.

Да би се применила једначина (3.6.2) потребно је одредити амплитуду и фазни став 3. хармоника укупне струје и капацитивне компоненте струје.

Амплитуда и фазни став 3. хармоника укупне струје одвођења се лако може одредити применом Фуријеове трансформације измереног сигнала укупне струје одвођења. Међутим, одређивање амплитуде и фазног става 3. хармоника капацитивне компоненте струје није тако једноставно. Идеја је да се искористи измерена вредност индуковане струје у капацитивној сонди (I_p). Имајући у виду да се струја индукује због капацитивне спреге, утицај на индуковану струју имају све три фазе. Међутим, 3. хармоник се понаша као нулта компонента, па је самим тим фазни став 3. хармоника индуковане струје једнак фазном ставу 3. хармоника капацитивне компоненте и независан је од положаја сонде.

Што се тиче одређивања амплитуде 3. хармоника капацитивне компоненте, ту је ситуација нешто тежа. Имајући у виду да капацитивности одводника и сонде нису познате, однос амплитуда 3. хармоника капацитивне и индуковане струје се мора одредити на други начин. С обзиром да основни хармоник укупне струје није много осетљив на промену резистивне компоненте струје, може се сматрати да су основни хармоници укупне и капацитивне компоненте струје одвођења једнаки. Тада важе следеће релације:

$$k_1 = \frac{I_{t1}}{I_{p1}} \approx \frac{I_{c1}}{I_{p1}} \quad (3.6.3)$$

$$k_3 = \frac{I_{c3}}{I_{p3}} \quad (3.6.4)$$

У једначинама (3.6.3) и (3.6.4) су k_1 (k_3) – коефицијенти који одређују однос основних (трећих) хармоника капацитивне и индуковане струје.

У монофазним апликацијама, коефицијенти k_1 и k_3 су једнаки. У трофазним апликацијама однос компоненти k_1 и k_3 зависи од положаја сонде. Експериментално је доказано да се за велики опсег напонских нивоа и за различите положаје сонде однос ових коефицијената мења у малом опсегу, па се ипак може усвојити једна просечна вредност $k_3/k_1=0,75$ [13].

Из свега напред реченог може се доћи до закључка да се 3. хармоник резистивне компоненте струје одвођења може одредити из измерених вредности укупне струје одвођења и индуковане струје применом следеће једначине:

$$I_{r3} = I_{t3} - 0.75 \cdot \frac{I_{t1}}{I_{p1}} \cdot I_{p3} \quad (3.6.5)$$

Предност ове методе је што није потребно мерити радни напон на одводнику. Међутим, примена методе директног одређивања 3. хармоника резистивне компоненте струје одвођења има и два основна недостатка. Први недостатак се огледа у непрецизности методе у зависности од положаја сонде (коэффициент 0,75 је просечна усвојена вредност). Други, значајнији, недостатак се огледа у чињеници да се овом методом врши компензација само капацитивног дела 3. хармоника струје одвођења. Познато је да се у случају постојања виших хармоника у напону, поред јављања виших хармоника капацитивне струје, јављају и виши хармоници резистивне струје који су директна последица хармоника напона. Они представљају један део виших хармоника резистивне струје. Показано је да постојање не само 3., него и осталих (нпр. 5., 7. и 11.) хармоника напона проузрокује промену 3. хармоника резистивне компоненте струје одвођења. Штавише, у зависности од фазног става хармоника напона, 3. хармоник резистивне компоненте струје се може или смањити или повећати и то у широком опсегу [1], [69]. Други део виших хармоника резистивне струје су последица нелинеарности МОП-а. Овај део виших хармоника постоји чак и у присуству простопериодичног напона и управо је он од велике важности за мониторинг и дијагностику МОП-а. Да би се одредио само тај део виших хармоника резистивне компоненте потребно је, поред компензације капацитивне компоненте, извршити и компензацију дела резистивне компоненте који је последица хармоника напона, а то овом методом није могуће урадити.

3.7. Метода основног хармоника резистивне компоненте струје одвођења

Метода основног хармоника резистивне компоненте струје одвођења се базира на линеарној зависности која постоји између вршне вредности основног хармоника резистивне компоненте струје и фазног помераја између основних хармоника капацитивне и укупне струје одвођења [14]. Оно што је веома важно јесте да је ова зависност независна од температуре за одређени тип МОП-а.

У складу са модификованом методом компензације (поглавље 3.5), важи следећа релација ортогоналности капацитивне и резистивне компоненте струје одвођења:

$$\int_0^T i_r \cdot i_{c1} \cdot dt = 0 \quad (3.7.1)$$

Вршне вредности основних хармоника резистивне и капацитивне компоненте се могу одредити применом следећих израза:

$$I_{r1m} = I_{t1m} \cdot \sin(\varphi_{c1t1}) \quad (3.7.2)$$

$$I_{c1m} = I_{t1m} \cdot \cos(\varphi_{c1t1}) \quad (3.7.3)$$

У једначинама (3.7.2) и (3.7.3) су: I_{t1m} , I_{r1m} , I_{c1m} – вршне вредности укупне струје, резистивне и капацитивне компоненте струје одвођења, респективно. Угао φ_{c1t1} је фазни померај између основних хармоника капацитивне компоненте и укупне струје одвођења.

Експериментално је доказано да постоји линеарна веза између вршне вредности основног хармоника резистивне компоненте струје и фазног помераја између основних хармоника капацитивне компоненте и укупне струје одвођења. Показано је да је ова зависност независна од стања одводника (нов-деградиран) и температуре одводника (у опсегу од 23°C -100°C) као и да је иста за исти тип одводника [14].

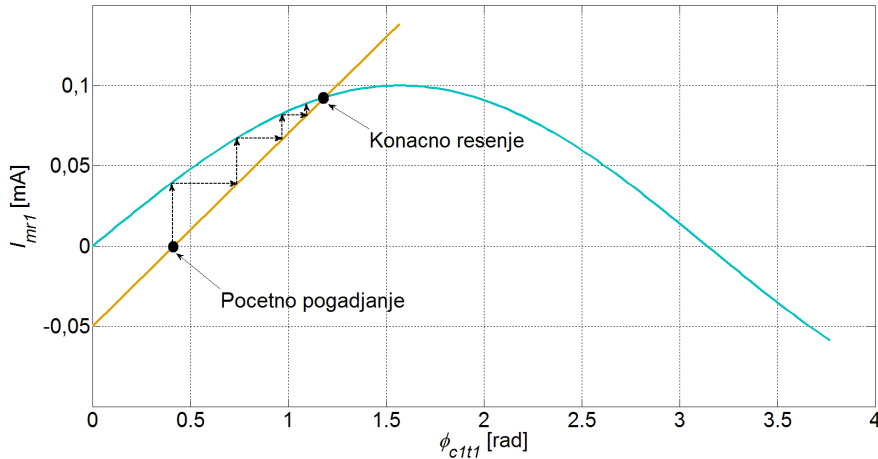
Добијена зависност се може представити изразом:

$$I_{r1m} = A \cdot \varphi_{c1t1} + B \quad (3.7.4)$$

У изразу (3.7.4) се коефицијенти A и B могу добити експериментално за сваки тип одводника.

Процедура одређивања основног хармоника резистивне компоненте је итеративна процедура симултаног решавања једначине (3.7.2) за конкретно мерење и једначине (3.7.4) за анализирани тип одводника. Приказ процедуре се може видети на Сл. 3.7.1.

Предности ове методе су што није потребно мерити радни напон МОП-а и то што хармоници напона немају утицај с обзиром да се користе само основни хармоници струја.



Сл. 3.7.1 Итеративна процедура одређивања струје I_{r1m}

3.8. Итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје одвођења

Итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје одвођења, за разлику од претходно анализираних метода је заснована на проширеном моделу МОП-а [15].

Једначине проширеног модела су:

$$i_r = i_t - C \cdot \frac{du}{dt} \quad (3.8.1)$$

$$u_r = \left(1 + \frac{C}{C_s}\right) \cdot u - \frac{1}{C_s} \cdot \int_0^T i_t \cdot dt \quad (3.8.2)$$

Имајући у виду да резистивна струја и напон на нелинеарном отпорнику достижу свој максимум у истом тренутку, могу се написати следеће релације:

$$\left. \frac{di_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \left. \left(\frac{di_t}{dt} - C \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \right) \right|_{t=t_m} = 0 \quad (3.8.3)$$

$$\left. \frac{du_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \left. \left(\left(1 + \frac{C}{C_s}\right) \cdot \frac{du}{dt} - \frac{i_t}{C_s} \right) \right|_{t=t_m} = 0 \quad (3.8.4)$$

Ако се измерени сигнали напона и струје представе преко Фуријеовог реда, где су Фуријеови коефицијенти напона означени са a_k и b_k , а Фуријеови коефицијенти струје са p_k и q_k , након краћег извођења (Прилог 1) може се добити веза између капацитивности C и C_s :

$$C_s = \frac{p_1^2 + q_1^2 + 2\omega C \cdot (a_1 q_1 - b_1 p_1) + \omega^2 C^2 \cdot (a_1^2 + b_1^2)}{\omega \cdot [(b_1 p_1 - a_1 q_1) - \omega C \cdot (a_1^2 + b_1^2)]} \quad (3.8.5)$$

Према изразу (3.8.5) се може одредити C_s ако је позната вредност C . C обзиром да ни вредност капацитивности C није позната, развијена је итеративна процедура којом се одређују резистивна струја и резистивни напон [15].

Итеративна процедура се базира на проналажењу параметара C и C_s за које су резистивна компонента струје и резистивни напон у фази. Процедура се састоји од следећих корака:

1. Претпоставити почетну вредност параметра C ;
2. Израчунати C_s користећи израз (3.8.5);
3. Израчунати резистивну компоненту струје и резистивни напон користећи изразе (3.8.1) и (3.8.2);
4. Проверити да ли су резистивна компонента струје и резистивни напон израчунати у претходном случају у фази (применом крос-корелације). Ако јесу, прекинути процедуру, у супротном одредити капацитивност C за наредну итерацију и вратити се на корак 2.

Да би се итеративна процедура могла спровести, потребно је још одредити изразе за прорачун параметра C из итерације у итерацију.

Ако се претпостави да је модел МОП-а упрошћен ($C_s = \infty$), из израза (3.8.5) се може одредити почетна вредност параметра $C^{(0)}$:

$$C^{(0)} = \frac{b_1 p_1 - a_1 q_1}{\omega(a_1^2 + b_1^2)} \quad (3.8.6)$$

За итеративно одређивање капацитивности се може усвојити рекурзивна формула:

$$C^{(n+1)} = C^{(n)} - \frac{C^{(0)}}{100000} \quad (3.8.7)$$

Приказана процедура показује одличне перформансе чак и у присуству виших хармоника у радном напону МОП-а [15].

За реализацију ове методе потребно је вршити мерења и радног напона и струје одвођења. Предности методе се огледају у томе што метода није осетљива на хармонике напона и што се као додатна вредност одређују параметри еквивалентне шеме C и C_s . Као и у раније описаним методама, као показатељи стања се могу користити максимална и ефективна вредност резистивне струје као и амплитуде виших хармоника резистивне струје.

4. МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А НА БАЗИ ГЕНЕТСКОГ АЛГОРИТМА

4.1. Уводна разматрања

Главни допринос ове дисертације јесте развој нове методе за мониторинг МОП-а којом се решавају основни недостаци метода које су до сада доминантно коришћене за мониторинг на бази анализе струје одвођења у погону [26], [70]. Као што је анализирано у претходним поглављима, неки недостаци постојећих метода су велика осетљивост на услове напајања, тј. на садржај виших хармоника напона и на колебање напона као и потреба за синхроним мерењем напона и струје одвођења. Развијена метода такође захтева мерења струје одвођења и напона напајања МОП-а, међутим не постоји потреба за синхроним мерењем ових величина што у многоме поједностављује процес мерења у погону [71]. Као показатељи стања МОП-а су уведени нови параметри који директно осликавају волт-амперску карактеристику. Као што је наведено у неколико наврата у претходним поглављима, деградација МОП-а утиче на промену волт-амперске карактеристике па се показује да су уведени параметри одлични показатељи стања.

Развијена метода је базирана на примени генетског алгоритма (ГА) за одређивање параметара еквивалентне шеме МОП-а у нормалним условима рада. У оквиру алгоритма се могу одредити параметри еквивалентне шеме било да је у питању упрошћен модел (Сл. 2.4.4) или проширен модел (Сл. 2.4.5). Предложени показатељи стања су коефицијенти k и α који су једни од параметара еквивалентних шема, тако да се они директно одређују применом предложене методе. У оквиру еквивалентних шема МОП-а коефицијенти k и α фигуришу у нелинеарном отпорнику, а дефинисани су у једначинама (2.4.2) и (2.4.4). Особине показатеља k и α су такве да се ови показатељи мењају са деградацијом одводника, а неосетљиви су на појаву виших хармоника и колебања напона. Једини спољни фактор који додатно утиче на промену показатеља k и α јесте амбијентална температура. Вршењем мониторинга увек у истим (сличним) амбијенталним условима и познавањем температурне зависности волт-амперске

карактеристике (поглавље 2.5) и проблем утицаја температуре се једноставно превазилази.

У литератури постоји неколико радова који се баве тематиком одређивања параметара еквивалентних шема МОП-а на бази примене оптимизационих алгоритама. Тако су аутори Li, Birlasekaran и Choi предложили *DFP* алгоритам оптимизације за минимизацију суме квадрата одступања измерене вредности заосталог напона од симулиране вредности заосталог напона који зависи од подешених параметара МОП-а [72]. Сличан приступ је показало и више других аутора уз примену различитих метода оптимизације. Тако је В. Abdelhafid оптимизациони задатак решио применом генетског алгоритма [73], а примену *Levenberg-Marquardt*-ове оптимизације су приказали Lira, Fernandes и Costa [74]. Нешто другачији приступ су показали Christodoulou, Gonos и Stathopoulos [50]. Коришћен је генетски алгоритам као алат за оптимизацију, али је објективна функција представљена као збир релативних грешака симулираног заосталог напона за различите амплитуде и таласне облике ударних струја. Комбинацију оптимизационих алгоритама *PSO* и *ACO* су представили Nafar, Gharehpetian и Niknam [75]. Оптимизациона процедура је такође коришћена за минимизацију суме квадрата одступања заосталих напона МОП-а. С обзиром да су сви наведени алгоритми разматрали случајеве заосталих напона приликом одвођења ударних струја, може се закључити да су њима одређивани параметри динамичких, фреквенцијски зависних модела приказаних на Сл. 2.4.1, Сл. 2.4.2 и Сл. 2.4.3. Потребно је напоменути да се ниједан од наведених радова не бави проблематиком мониторинга МОП-а.

За разлику од наведених алгоритама, метода предложена у овој дисертацији се базира на мерењу радног напона и струје одвођења МОП-а за одређивање параметара МОП-а у нормалним радним условима. Иако захтева мерења и напона и струје одвођења, предложена метода је погодна за мониторинг у погону јер не захтева синхрона мерења ових величина, а даљи развој методе пружа и могућности елиминисања мерног сигнала напона.

Рачунарским симулацијама и лабораторијским испитивањима је показано да метода није осетљива на садржај виших хармоника радног напона и на

колебање напона. Такође је извршена и компаративна анализа развијене методе и метода које су описане у поглављу 3.

4.2. Опис методе

Као што је речено, развијена метода је базирана на примени генетског алгоритма. ГА представља оптимизациони алгоритам претраге простора опонашајући процесе еволуције и природне генетике. ГА започиње претрагу сетом насумично изабраних решења, обично кодираних у бинарни низ (хромозом). Сваком решењу се приписује одређена *fitness* функција која директно осликава решење објективне функције одговарајућег решења. Након тога, на читав сет решења (популацију) се примењују три основна оператора: репродукција, укрштање и мутација. Циљ ових оператора је да се у наредној генерацији (итерацији) добије популација која у себи садржи боље хромозоме, тј. решења која су ближа оптималном решењу. Након достизања унапред дефинисаног критеријума, прекида се итеративни поступак и најбоље решење популације се проглашава оптималним решењем. Детаљнији опис принципа рада генетског алгоритма је дат у Прилог 2 – Генетски алгоритам.

Оптимизациони задатак предложене методе је минимизација суме квадрата одступања таласних облика измерене струје одвођења и струје одвођења прорачунате на основу измереног радног напона и еквивалентне шеме МОП-а:

$$OF = \int_{t=0}^T (i_{tm}(t) - i_{ts}(t, \mathbf{x}))^2 \cdot dt \quad (4.2.1)$$

У једначини (4.2.1) је OF објективна функција, T је периода сигнала, i_{tm} је измерена вредност укупне струје одвођења, i_{ts} је симулирана вредност укупне струје одвођења, а \mathbf{x} представља вектор променљивих величина.

Имајући у виду да су измерена и симулирана струја дискретне величине, једначина (4.2.1) се може записати у следећем облику:

$$OF = \sum_{n=1}^N (i_{tm}(n) - i_{ts}(n, \mathbf{x}))^2 \cdot \Delta t \quad (4.2.2)$$

У једначини (4.2.2) је n редни број одбирка, N је укупан број одбирака у периоди, а Δt представља корак одабирања.

У једначинама (4.2.1) и (4.2.2) струја i_{tm} се може добити мерењем струје одвођења у погону применом обухватног струјног трансформатора погодног за мерење малих струја. Управо се овакви струјни трансформатори користе у уређајима за мониторинг МОП-а који су доступни на тржишту.

Струја i_{ts} се може одредити применом једначина (2.4.1) и (2.4.2) у случају моделовања упрошћеном еквивалентном шемом, односно једначина (2.4.3) и (2.4.4) у случају моделовања проширеном еквивалентном шемом. Због комплетности описа предложене методе ове једначине ће, уз мале модификације, овде бити поновљене.

У случају моделовања упрошћеном еквивалентном шемом са Сл. 2.4.4, струја i_{ts} се може одредити из израза:

$$i_{ts}(t, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{du_m(t)}{dt} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_m(t)}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.2.3)$$

$$\mathbf{x} = [C \ k \ \alpha] \quad (4.2.4)$$

односно у случају дискретног записа:

$$i_{ts}(n, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{u_m(n + 0,5) - u_m(n - 0,5)}{\Delta t} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_m(n)}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.2.5)$$

У једначинама (4.2.3) и (4.2.5) u_m представља измерену вредност радног напона МОП-а, а једначином (4.2.4) је дефинисан вектор променљивих величина у случају упрошћене еквивалентне шеме. У једначини (4.2.5) се вредности измерених напона на половини интервала (између две измерене вредности) могу добити рачунарском интерполацијом измереног сигнала.

У случају моделовања проширеном еквивалентном шемом са Сл. 2.4.5, струја i_{ts} се може одредити из израза:

$$u_r(t, \mathbf{x}) = \left(1 + \frac{C}{C_s} \right) \cdot u_m(t) - \frac{1}{C_s} \cdot \int_{t=0}^T i_{tm}(t) \cdot dt \quad (4.2.6)$$

$$i_{ts}(t, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{du_m(t)}{dt} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_r(t, \mathbf{x})}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.2.7)$$

односно у случају дискретног записа:

$$u_r(n, \mathbf{x}) = \left(1 + \frac{C}{C_s} \right) \cdot u_m(n) - \frac{1}{C_s} \cdot \sum_{n=1}^N i_{tm}(n) \cdot \Delta t \quad (4.2.8)$$

$$i_{ts}(n, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{u_m(n + 0,5) - u_m(n - 0,5)}{\Delta t} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_r(n, \mathbf{x})}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.2.9)$$

$$\mathbf{x} = [C_s \ C \ k \ \alpha] \quad (4.2.10)$$

Све величине у једначинама (4.2.6) - (4.2.10) су већ дефинисане.

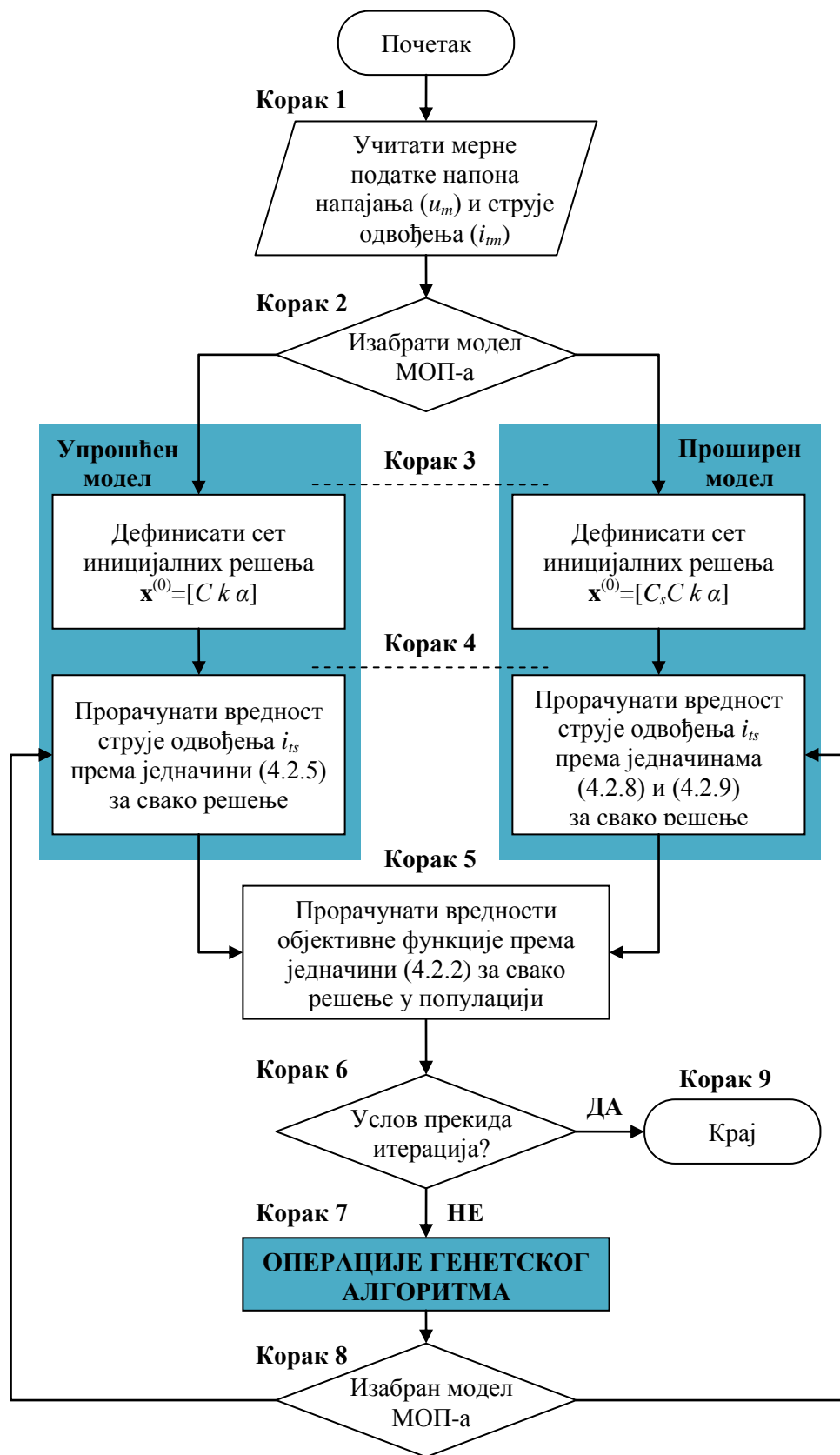
Предложени алгоритам за мониторинг МОП-а на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже се може описати кроз следећих 9 корака:

1. Учитати измерене податке напона напајања (u_m) и струје одвођења (i_m). Потребно је користити мерне податке у току једне периоде са периодом одабирања која омогућава уважавање виших хармоника напона. Учестаност одабирања од 10 kHz је довољна за анализу виших хармоника до 100. реда, што је више него довољно.
2. Изабрати модел МОП-а који ће се користити за анализе. Може се изабрати један од два модела приказана у поглављу 2.4. Избор модела утиче на вектор променљивих величина и на једначине за прорачун струје одвођења.
3. Дефинисати почетна решења целе популације. Популација представља скуп решења променљивих величина. У случају упрошћеног модела те величине су C , k и α , док је у случају проширеног модела потребно додати и параметар C_s . Колико се решења налази у једној популацији, зависи од изабране величине популације у оквиру ГА. Иницијална популација решења се може изабрати насумично, али у циљу брже конвергенције и бољих перформанси алгоритма иницијална популација може бити базирана на очекиваним вредностима параметара који су познати за нов одводник или су за конкретан одводник добијени током претходног мониторинга тог одводника.
4. Прорачунати вредност струје одвођења према једначинама које зависе од изабраног модела МОП-а. У случају упрошћеног модела прорачун се врши према једначини (4.2.5), док се за проширен модел користе једначине (4.2.8) и (4.2.9).

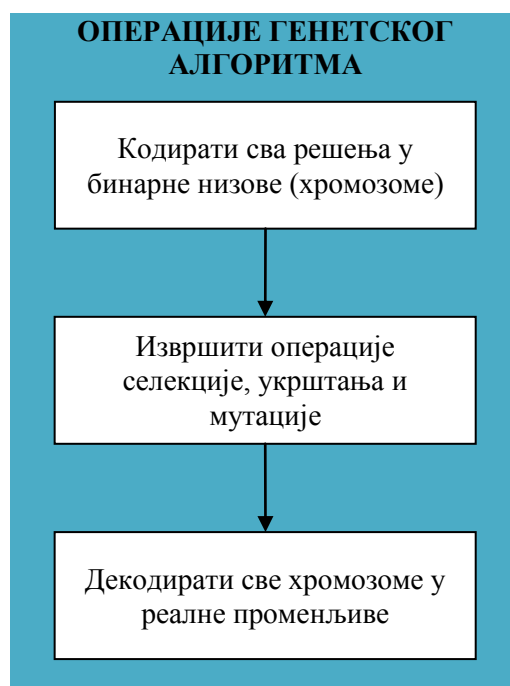
5. Прорачунати вредност објективне функције према једначини (4.2.2) за свако решење у популацији. На основу вредности објективне функције сваком решењу доделити *fitness* вредност.
6. Испитати услов конвергенције, тј. услов прекида итерација. Овај услов може бити максималан број итерација (који се често користи) или неки други критеријум као што је стандардна девијација *fitness* вредности популације. У случају да је услов испуњен прелази се на корак 9, у супротном се наставља процедура са кораком 7.
7. У циљу добијања нове популације са бољим решењима, у оквиру овог корака се врше операције генетског алгоритма. Прво је потребно извршити кодирање вектора променљивих у хромозоме који су представљени бинарним вредностима. Друго, потребно је извршити операције селекције, укрштања и мутације како би се добила нова популација решења. Треће, потребно је извршити декодирање хромозома у реалне променљиве како би било могуће наставити са прорачунима према одговарајућим једначинама. Процеси кодирања, декодирања, селекције, укрштања и мутације су објашњени у Прилог 2 – Генетски алгоритам.
8. Повратак на корак 4 и прорачун струје одвођења у зависности од изабраног модела МОП-а.
9. Завршетак процедуре. Оптималним решењем се проглашава најбоље решење у популацији.

На Сл. 4.2.1 је приказан блок дијаграм предложеног алгоритма. Део дијаграма са Сл. 4.2.1, под називом операције генетског алгоритма је приказан на Сл. 4.2.2.

Перформансе предложеног алгоритма, као и осетљивост алгоритма на садржај виших хармоника напона и колебање напона су анализирани у оквиру поглавља које се бави рачунарским симулацијама алгоритама за мониторинг МОП-а. У оквиру тог поглавља су извршена поређења предложеног алгоритма и постојећих алгоритама који су приказани у поглављу 3. Такође су извршена и лабораторијска испитивања на реалном одводнику пренапона са циљем верификације предложеног алгоритма.



Сл. 4.2.1 Блок дијаграм предложеног алгоритма за мониторинг МОП-а



Сл. 4.2.2 Операције генетског алгоритма

4.3. Елиминација потребе за синхроним мерењем напона и струје одвођења

У више наврата је речено да је један од главних недостатака појединих метода потреба за мерењем и напона напајања и струје одвођења МОП-а. Као што је наведено у поглављу 4.2 и предложена метода такође захтева мерења обе величине. Међутим, проблем код мерења и напона и струје одвођења настаје у случају потребе за синхроним мерењем ових величина. Оваква мерења су доминантно везана за коришћење једног уређаја са два мерна канала, а приступ крајевима секундарна напонских трансформатора и проводнику за уземљење одводника пренапона углавном није могућ са једног места. Овај проблем се може решити предложеном методом за мониторинг МОП-а увођењем једне додатне променљиве величине. Наиме, увођење фазне грешке, тј. фазног помераја између мерених величина напона напајања и струје одвођења елиминише потребу за синхроним мерењем ових величина. Увођењем фазне грешке као променљиве величине се такође елиминишу и постојеће фазне грешке мерних трансформатора што додатно појачава значај проширења предложене методе.

Фазни померај се може придружити било сигналу напона било сигналу струје. У овој методи је фазни померај придружен сигналу напона напајања.

Пошто је у дискретном запису фазни померај еквивалентан померању сигнала за одређени број одбирака, једначина за прорачун струје одвођења упрошћеног модела се може изразити као:

$$i_{ts}(n, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{u_m(n + d + 0,5) - u_m(n + d - 0,5)}{\Delta t} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_m(n + d)}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.3.1)$$

$$\mathbf{x} = [C \ k \ \alpha \ d] \quad (4.3.2)$$

односно за проширен модел:

$$u_r(n, \mathbf{x}) = \left(1 + \frac{C}{C_s} \right) \cdot u_m(n + d) - \frac{1}{C_s} \cdot \sum_{n=1}^N i_{tm}(n) \cdot \Delta t \quad (4.3.3)$$

$$i_{ts}(n, \mathbf{x}) = C \cdot \frac{u_m(n + d + 0,5) - u_m(n + d - 0,5)}{\Delta t} + i_{ref} \cdot k \cdot \left(\frac{u_r(n, \mathbf{x})}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.3.4)$$

$$\mathbf{x} = [C_s \ C \ k \ \alpha \ d] \quad (4.3.5)$$

Осим величина и параметара који су дефинисани раније, у једначинама (4.3.1) - (4.3.5) d представља број одбирака за који је потребно померити мерени сигнал напона да би се елиминисала фазна грешка мерних трансформатора и фазна грешка која настаје услед несинхроног мерења напона и струје.

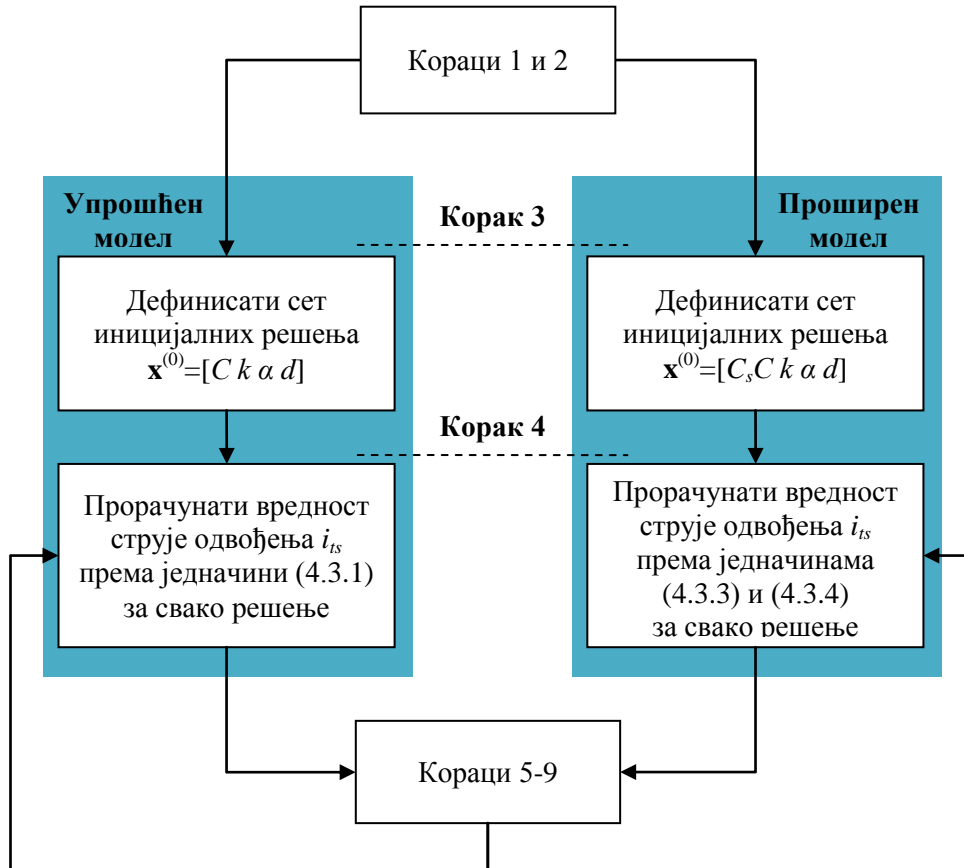
Сам алгоритам предложене методе се суштински не мења увођењем нове променљиве, једино је потребно проширити вектор променљивих величина и за прорачун струја одвођења користити једначине (4.3.1), односно (4.3.3) и (4.3.4). Кораци 1 и 2, као и кораци од 5 до 9 остају исти, једине модификације се виде у корацима 3 и 4 (Сл. 4.3.1).

Суштински се алгоритам своди на померање таласног облика струје унутар временског периода у којем је извршено мерење напона са циљем проналажења периоде напона која најбоље одговара измереној периоди струје одвођења (Сл. 4.3.2). Приликом мерења напона и струје, потребно је држати се следећег принципа:

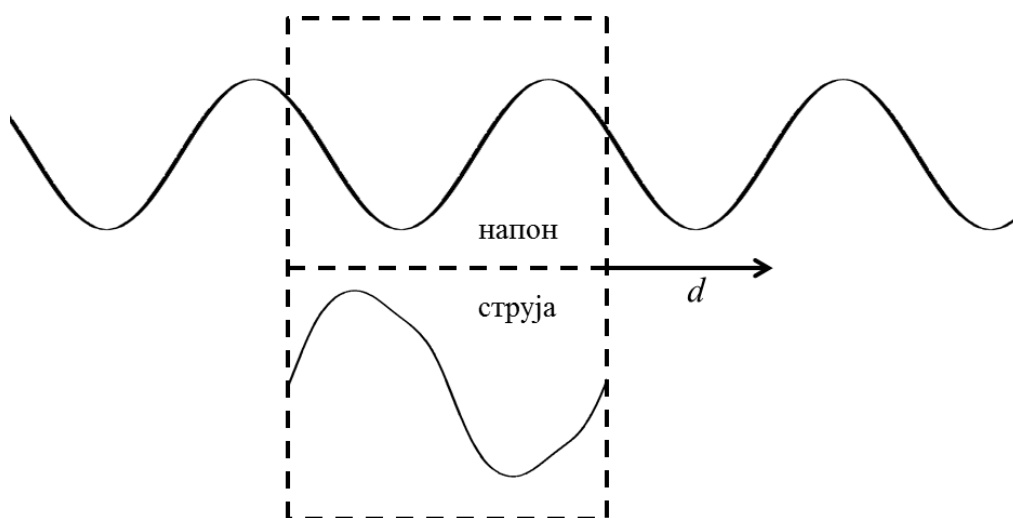
1. започети мерење напона;
2. започети мерење струје;
3. прекинути мерење струје;

4. прекинути мерење напона.

Перформансе алгоритма су анализирани рачунарским симулацијама, а резултати симулација су приказани у поглављу 5.



Сл. 4.3.1 Блок дијаграм методе без синхроног мерења напона и струје



Сл. 4.3.2 Принцип уважавања фазне грешке

5. РАЧУНАРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ ЗА АНАЛИЗУ ПЕРФОРМАНСИ МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А

5.1. Уводна разматрања

У циљу компаративне анализе перформанси алгоритама за мониторинг МОП-а заснованих на анализи струје одвођења при радном напону мреже, извршене су рачунарске симулације у програмском пакету MATLAB. Два су основна циља извршених рачунарских симулација:

1. Анализа тачности самих метода за мониторинг МОП-а,
2. Анализа поузданости показатеља стања МОП-а који се одређују приказаним методама.

Оба наведена аспекта су анализирана за различита стања одводника и за различите услове напајања са аспекта колебања напона и виших хармоника напона напајања. Поред тога, тачност метода за мониторинг МОП-а је анализирана приликом примене различитих еквивалентних модела МОП-а као и приликом појаве фазне грешке која је последица потребе за синхроним мерењем таласних облика струје одвођења и напона напајања.

Оба аспекта рачунарских симулација су базирана на истом принципу. Рачунарски се дефинишу параметри модела МОП-а и напон напајања са изабраним садржајем виших хармоника одређених фазних ставова, након чега се у зависности од изабраног модела МОП-а прорачунавају капацитивна, резистивна и укупна струја одвођења МОП-а. Овако дефинисан напон напајања и прорачуната укупна струја одвођења се сматрају измереним вредностима које се користе у алгоритмима за мониторинг, а прорачуната резистивна компонента струје одвођења као и показатељи који се из ње одређују се користе као тачне вредности приликом одређивања грешака алгоритама. Величине и параметри одводника који су коришћени у симулацијама су приказани у Таб. 5.1.1.

Таб. 5.1.1 Величине и параметри одводника који су коришћени у симулацијама

Величине и параметри	Вредност
Називни напон мреже	$U_n = 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$
Трајни радни напон	$U_c = 8 \text{ kV}_{\text{rms}}$
Назначени напон	$U_r = 1.25 U_c = 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$
Референтна струја	$i_{ref} = 1 \text{ mA}_{\text{peak}}$
Референтни напон	$U_{ref} = 12.8 \text{ kV}$
Коефицијент нелинеарности	$\alpha = 5$
Капацитивност одводника	$C = 100 \text{ pF}$

5.2. Анализа тачности метода за мониторинг МОП-а

Циљ анализе тачности метода за мониторинг МОП-а на бази анализе струје одвођења јесте да се одреде грешке које поједине методе праве приликом прорачуна релевантних показатеља стања МОП-а у различитим условима напајања и при различитим стањима самог МОП-а. Све анализе су извршене у пет различитих случајева:

1. Варирање коефицијента нелинеарности МОП-а у опсегу од $\alpha=2$ до $\alpha=6$, чиме се симулира промена стања одводника,
2. Варирање ефективне вредности напона напајања у опсегу од $u=0,9$ г.ј. до $u=1,1$ г.ј., чиме се симулира флукуација напона,
3. Варирање садржаја 3., 5. и 7. хармоника напона напајања у опсегу од 0% до 5%, као и њихових фазних ставова у опсегу од -180° до 180° , чиме се симулирају реалне промене услова напајања МОП-а,
4. Варирање капацитивности C_s проширеног модела МОП-а у опсегу од 10^{-10} F до 10^{-9} F , чиме се анализира утицај еквивалентне шеме МОП-а на грешке метода,
5. Варирање фазне грешке између напона напајања и укупне струје одвођења у опсегу од -2° до 2° , чиме се симулирају фазне грешке мерних трансформатора и несинхроно мерење напона и струје.

У оквиру симулација су анализиране следеће методе за мониторинг МОП-а:

1. Метода хармонијске анализе струје одвођења (*HARM* метода),
2. Метода директног читавања максималне вредности резистивне компоненте струје одвођења (*DIR* метода),
3. Метода директног читавања резистивне компоненте струје одвођења (*POW* метода),
4. Метода губитака активне снаге (*P* метода),
5. Метода компензације са променљивим коефицијентима (*VCC* метода),
6. Метода ортогоналности струја (*COM* метода),
7. Итеративна метода за одређивање резистивне компоненте струје (*ITER* метода),
8. Метода на бази генетског алгорита (*GA* метода).

У циљу анализе тачности набројаних метода, дефинисане су грешке одређивања релевантних показатеља стања за сваку од метода. За методе које могу одредити таласне облике резистивне струје одвођења дефинисана је грешка [22]:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5.2.1)$$

$$SSE = \sum_{j=1}^n [i_{rj}^s - \hat{i}_{rj}]^2 \quad (5.2.2)$$

$$SST = \sum_{j=1}^n [i_{rj}^s - \bar{i}_r^s]^2 \quad (5.2.3)$$

У претходним једначинама R^2 представља показатељ одступања два таласна облика са максималном вредношћу 1 која одговара апсолутном поклапању таласа, SSE представља суму квадрата одступања два таласна облика, SST представља суму квадрата одступања једног таласног облика од своје средње вредности, n је укупан број одбирака, i_{rj}^s је j -ти одбирак симулиране резистивне компоненте струје која се сматра тачном вредношћу, \bar{i}_r^s је средња вредност симулиране резистивне струје и \hat{i}_{rj} представља j -ти одбирак резистивне компоненте струје одређене неком од метода. Овако дефинисан показатељ се

користи за анализу грешке приликом одређивања резистивне компоненте струје применом *POW*, *VCC*, *COM*, *ITER* и *GA* методе.

Грешке осталих показатеља се одређују на основу релативне процентуалне грешке према изразу:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{(x - x^s)}{x^s} \cdot 100\% \quad (5.2.4)$$

У изразу (5.2.4), δx представља релативну грешку, Δx представља апсолутну грешку, x^s представља показатељ стања МОП-а прорачунат на основу симулираних таласних облика који се сматра тачном вредношћу, x представља показатељ стања МОП-а прорачунат на основу неке од метода. Показатељи чије се грешке одређују применом једначине (5.2.4) су:

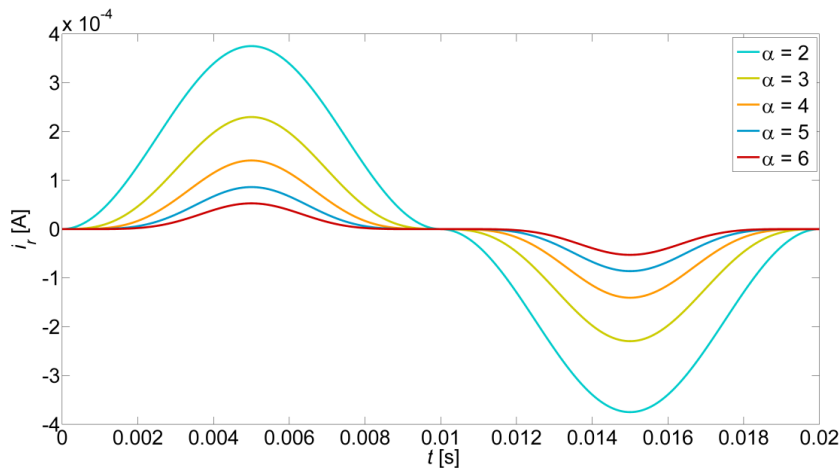
1. 1. и 3. хармоник резистивне компоненте струје одређени применом *HARM* методе,
2. максимална вредност резистивне струје одређена *DIR* методом,
3. активна снага губитака одређена *P* методом,
4. капацитивност МОП-а одређена *COM*, *ITER* и *GA* методом,
5. коефицијент нелинеарности одређен *GA* методом,
6. коефицијент k одређен *GA* методом.

Овде је потребно напоменути да капацитивност МОП-а не представља показатељ стања МОП-а јер је експериментално показано да се не мења са деградацијом [25], али је грешка прорачуна капацитивности добар показатељ тачности метода којим се оне одређују. Такође, до сада није показано како се мења коефицијент k (дефинисан једначином (2.3.1)) са деградацијом МОП-а. У оквиру спроведених симулација се коефицијент k одржава на константној вредности, а промене овог коефицијента са условима напајања су анализиране у оквиру експерименталних испитивања.

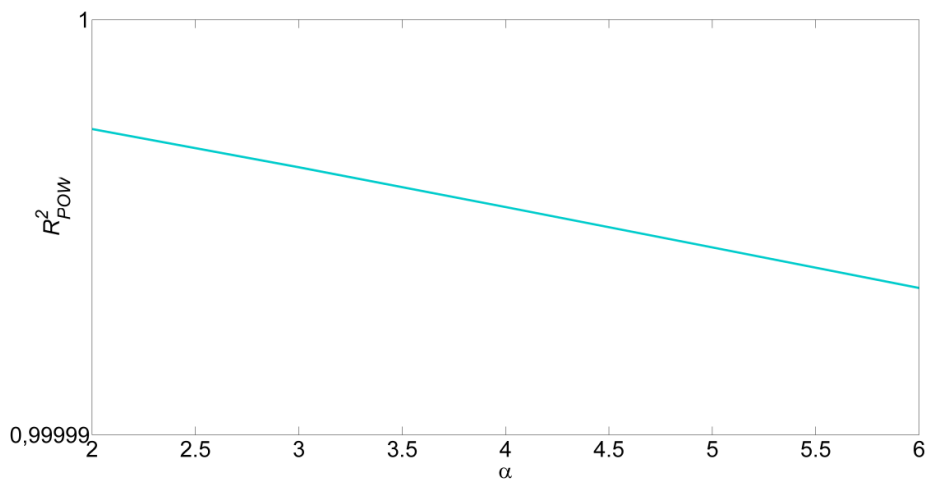
5.2.1 Варирање коефицијента нелинеарности

Као што је већ напоменуто, приликом ове анализе је вариран коефицијент нелинеарности у опсегу од $\alpha=2$ до $\alpha=6$, чиме се симулира промена стања одводника, док су остали параметри МОП-а као у Таб. 5.1.1. Показатељи грешака који су дефинисани у поглављу 5.2 су одређени за сваку од ових вредности коефицијента нелинеарности. На Сл. 5.2.1 су приказани таласни облици

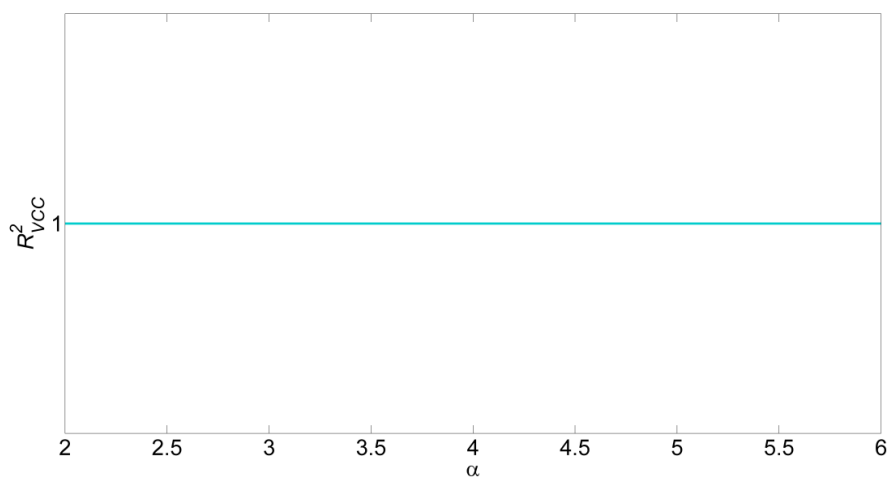
симулираних резистивних струја за сваки од коефицијената нелинеарности. Резистивне струје које су одређене *POW*, *VCC*, *COM*, *ITER* и *GA* методама се у потпуности поклапају са симулираним таласним облицима, а R^2 показатељи за сваку од ових метода су приказани на Сл. 5.2.2 - Сл. 5.2.6. Релативне процентуалне грешке осталих показатеља, као што је дефинисано у поглављу 5.2, су приказане на Сл. 5.2.7 - Сл. 5.2.14. Са ових слика се може закључити да су грешке свих метода приликом варијације коефицијента нелинеарности занемарљиве. Највеће грешке се јављају код одређивања коефицијента α (-1,22%) и k (2,76%) применом *GA* методе, међутим ове грешке су последица изабране тачности променљивих величина у самој методи, као и величине популације и броја генерација у оквиру *GA* методе. Променом параметара генетског алгорита могуће је и ове грешке смањити.



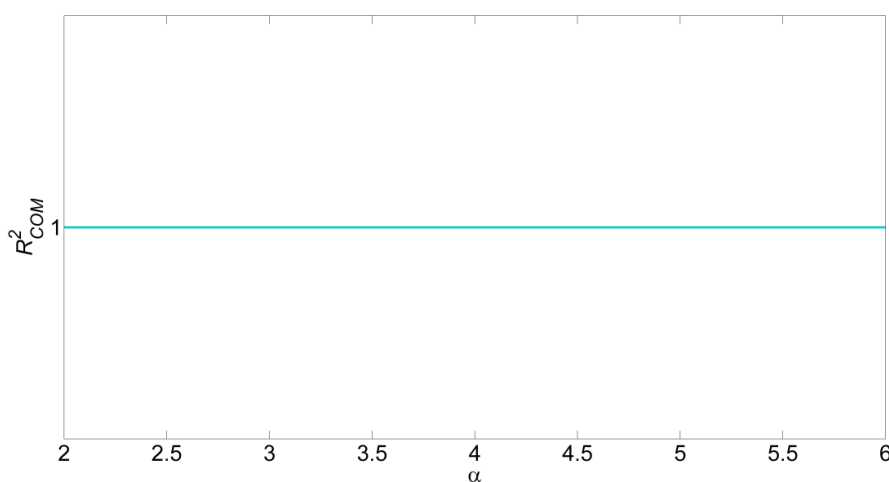
Сл. 5.2.1 Резистивна струја при различитим коефицијентима нелинеарности



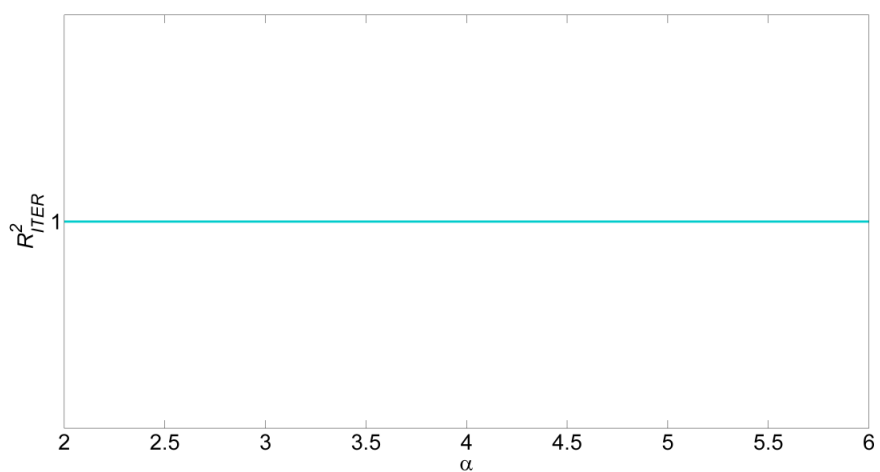
Сл. 5.2.2 R^2 показатељ *POW* методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



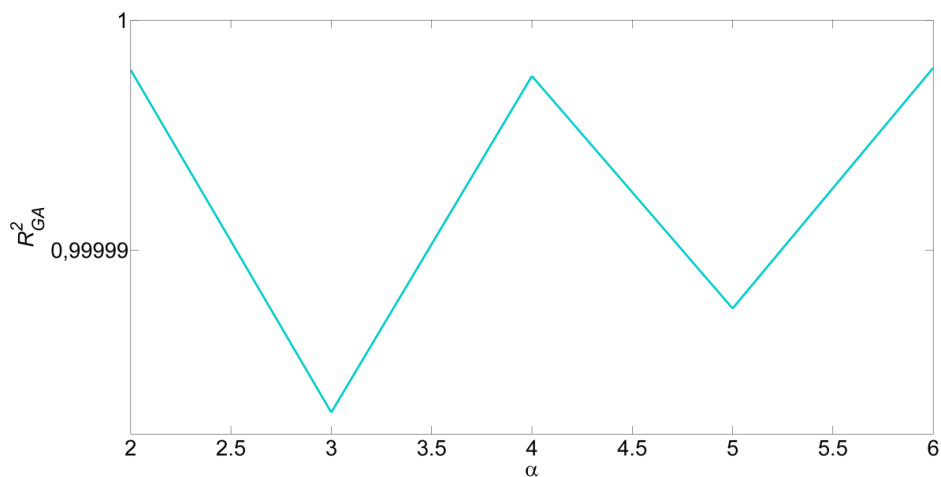
Сл. 5.2.3 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



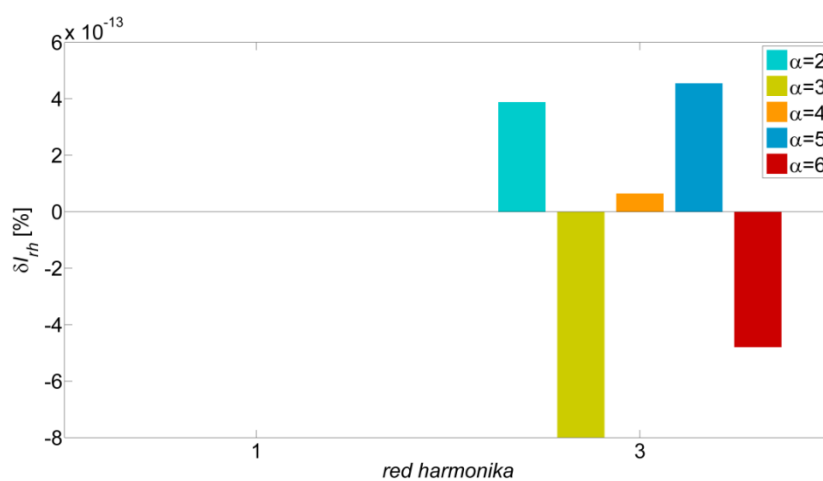
Сл. 5.2.4 R^2 показатељ COM методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



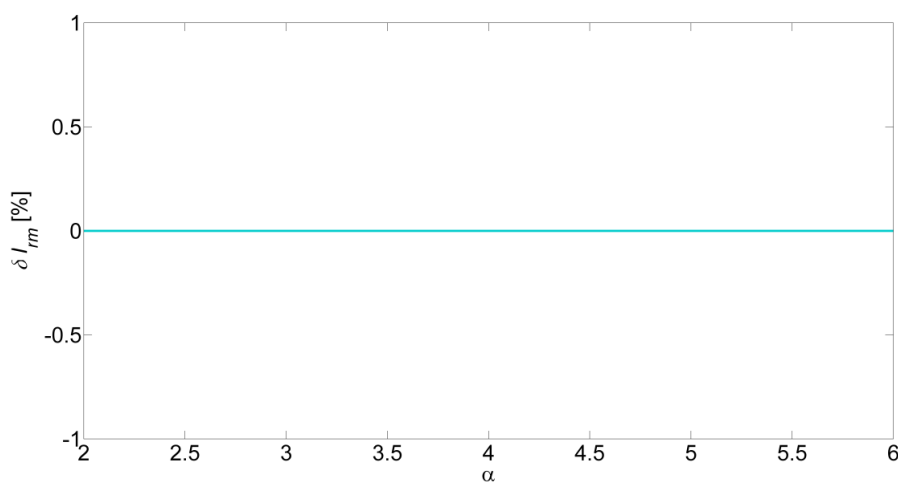
Сл. 5.2.5 R^2 показатељ $ITER$ методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



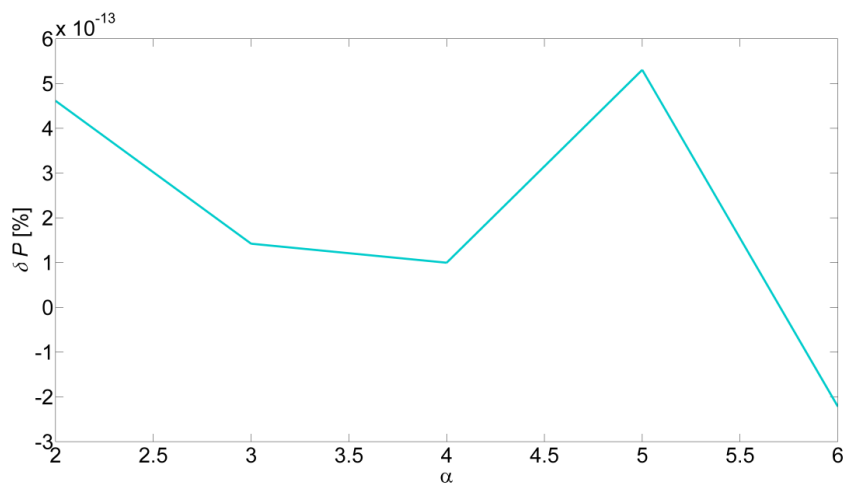
Сл. 5.2.6 R^2 показатељ GA методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



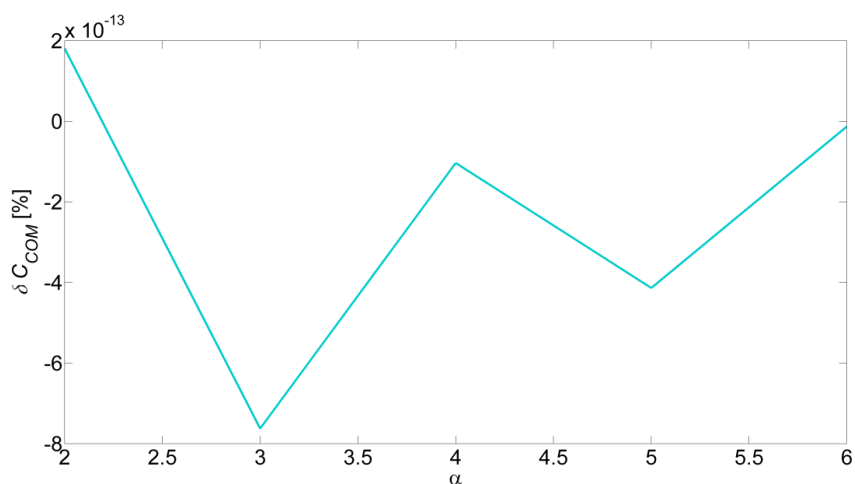
Сл. 5.2.7 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом $HARM$ методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



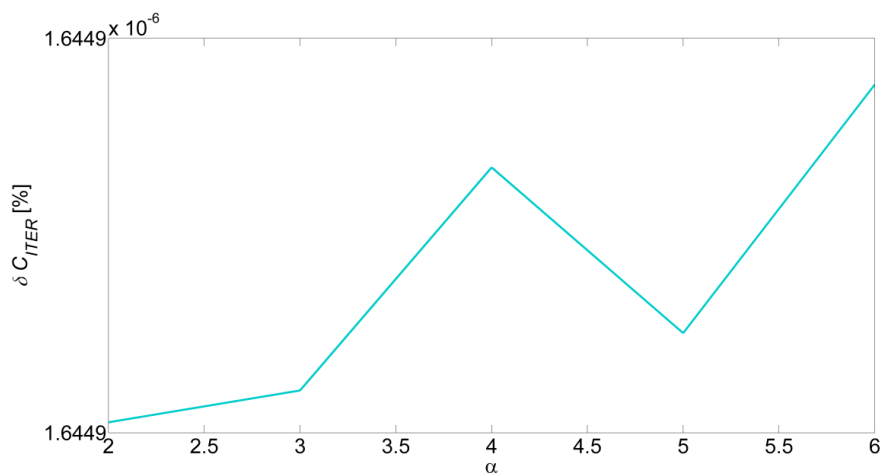
Сл. 5.2.8 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом DIR методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



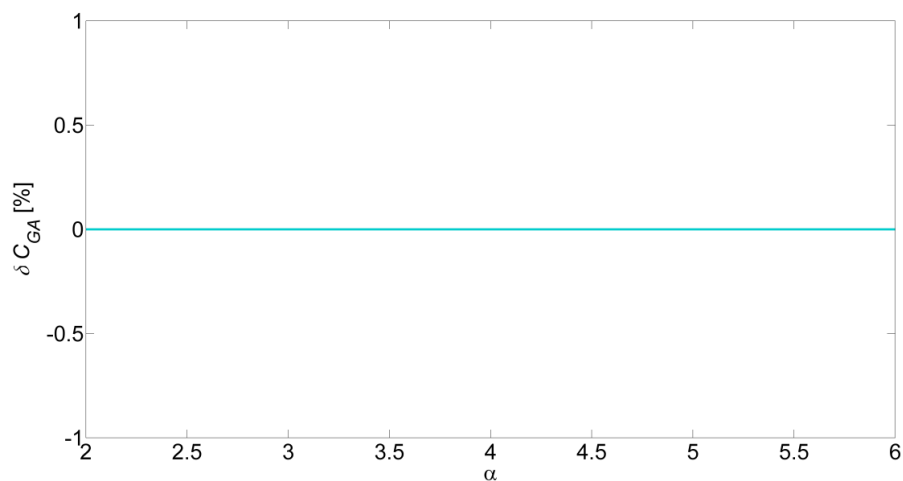
Сл. 5.2.9 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом P методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



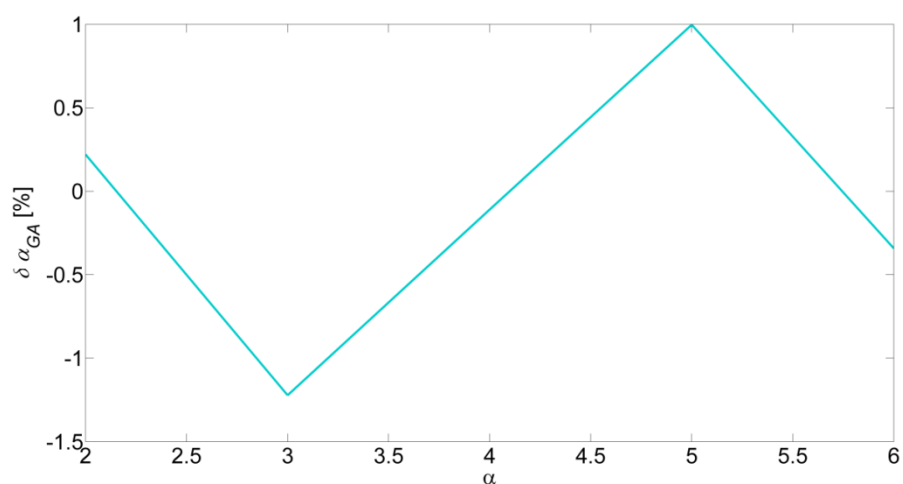
Сл. 5.2.10 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом COM методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



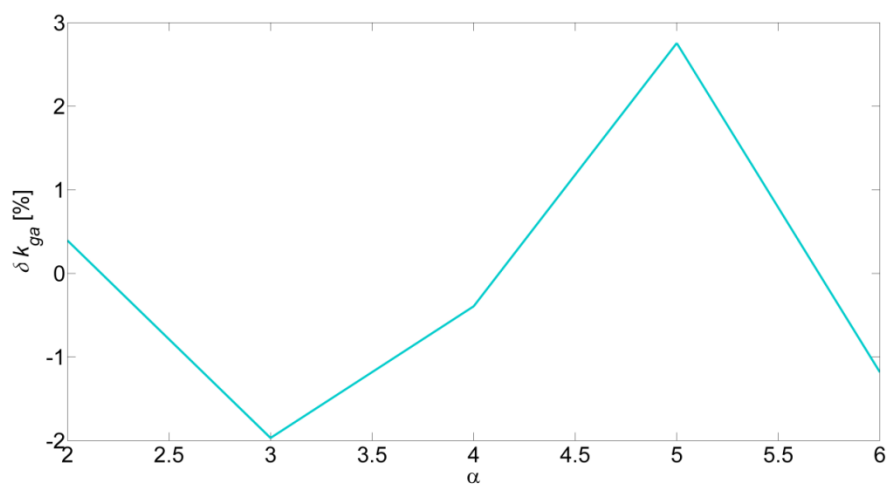
Сл. 5.2.11 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом $ITER$ методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



Сл. 5.2.12 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације коефицијента нелинеарности



Сл. 5.2.13 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације коефицијента нелинеарности

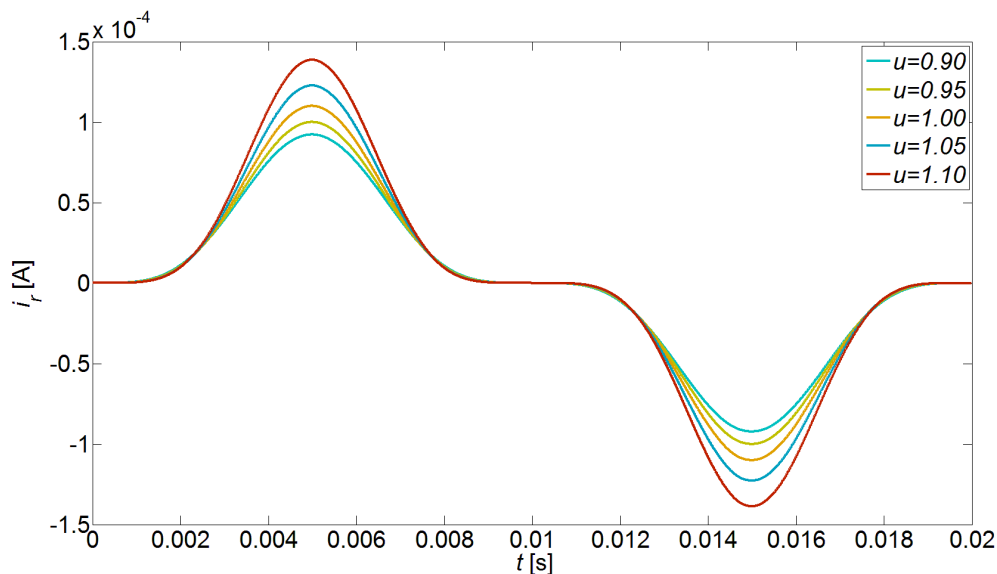


Сл. 5.2.14 Релативна грешка одређивања коефицијента *k* применом *GA* методе приликом варијације коефицијента нелинеарности

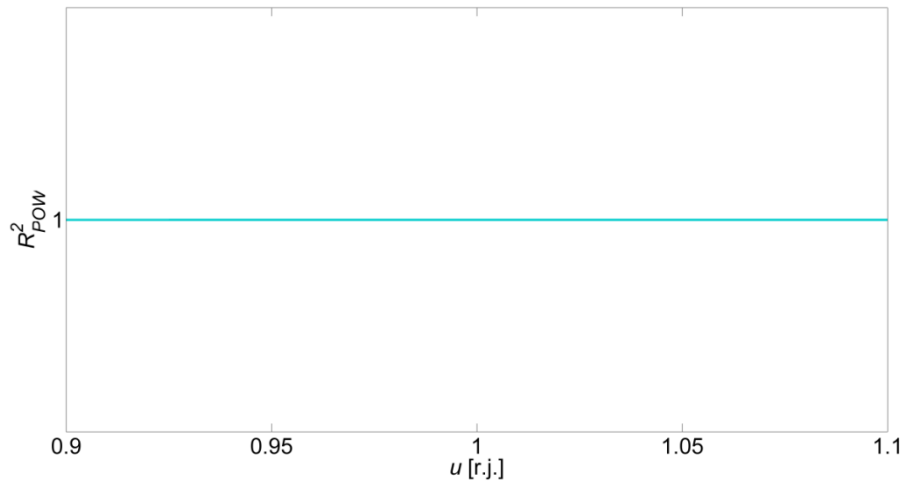
5.2.2 Флуктуација напона напајања

Као што је већ напоменуто, приликом ове анализе вршено је варирање ефективне вредности напона напајања у опсегу од $u=0,9$ r.j. до $u=1,1$ r.j., где је за базну вредност усвојен називни напон мреже дефинисан у Таб. 5.1.1. Уважавајући чињеницу да се коефицијент нелинеарности мења са променом напона напајања МОП-а, за потребе ове анализе усвојена је линеарна зависност по којој се коефицијент нелинеарности креће у опсегу $\alpha=4\div 5$ за дефинисан опсег промене напона. Остали параметри МОП-а су исти као у Таб. 5.1.1.

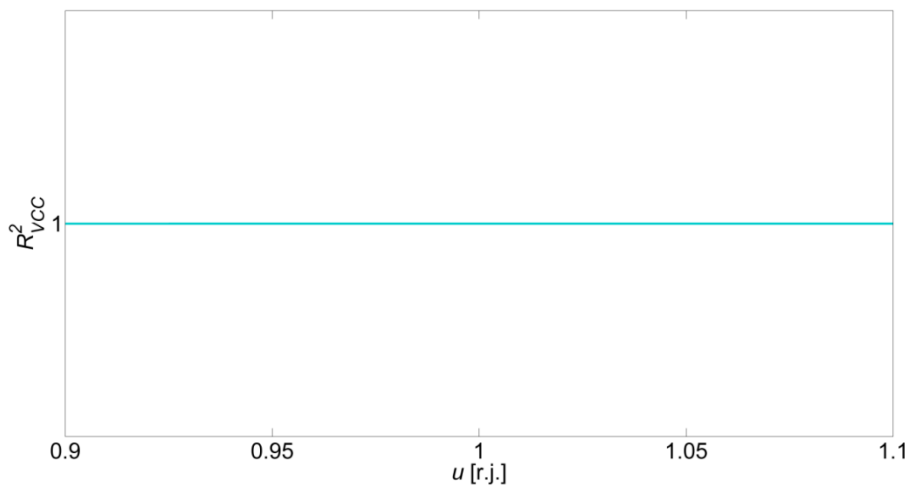
Показатељи грешака који су дефинисани у поглављу 5.2 су одређени за сваку од дефинисаних вредности напона напајања. Дијаграми резистивних струја су приказани на Сл. 5.2.15, а R^2 показатељи за сваку од анализираних метода су приказани на Сл. 5.2.16 - Сл. 5.2.20. Релативне процентуалне грешке осталих показатеља, као што је дефинисано у поглављу 5.2, су приказане на Сл. 5.2.21 - Сл. 5.2.28. Може се извести закључак да је утицај флуктуације напона на грешке алгоритама за мониторинг МОП-а занемарљив.



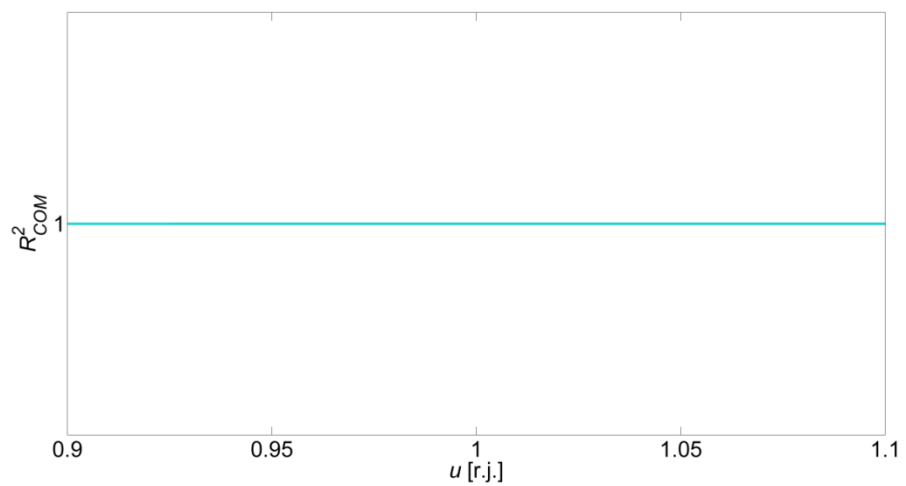
Сл. 5.2.15 Резистивна струја при различитим напонима напајања



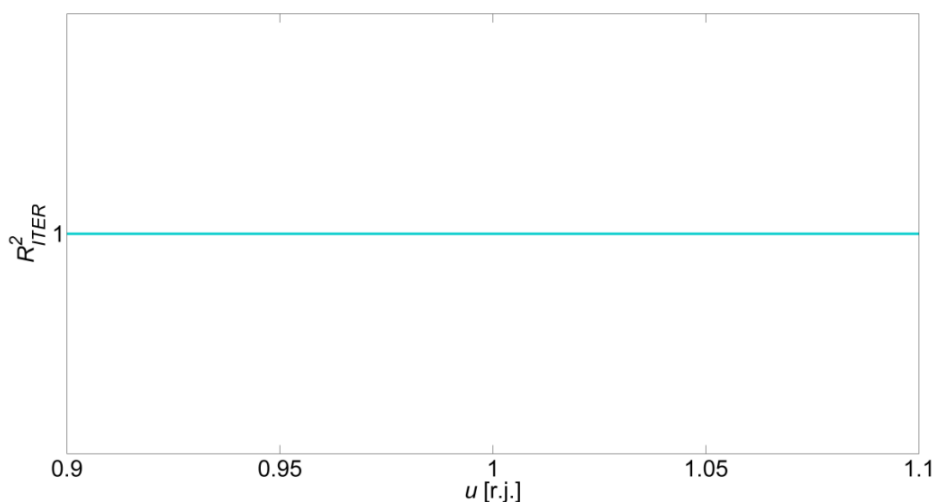
Сл. 5.2.16 R^2 показатељ POW методе приликом варијације напона напајања



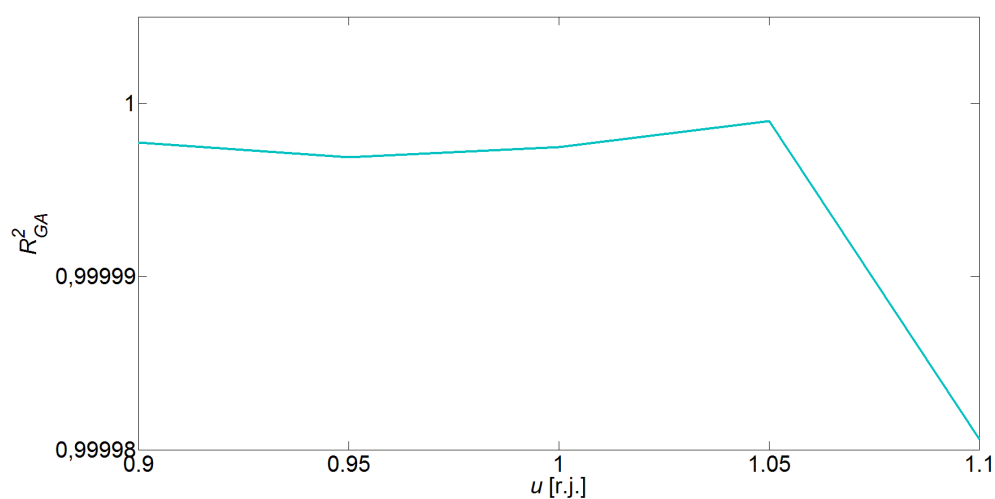
Сл. 5.2.17 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације напона напајања



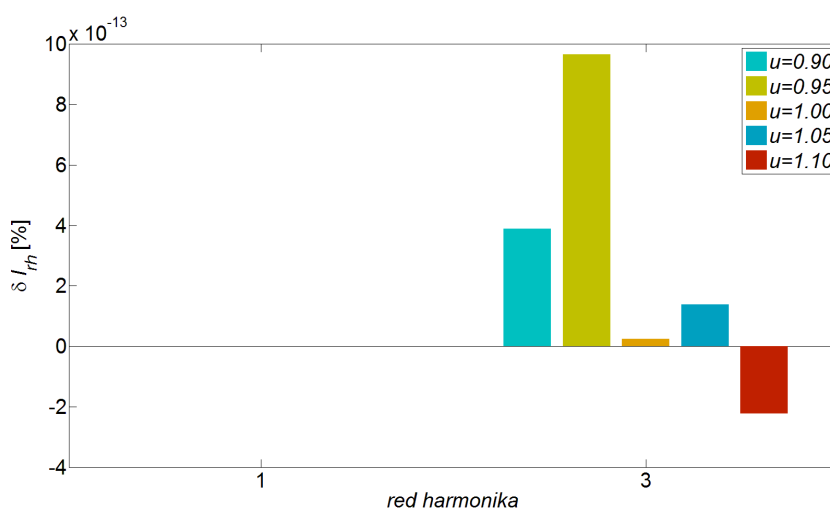
Сл. 5.2.18 R^2 показатељ COM методе приликом варијације напона напајања



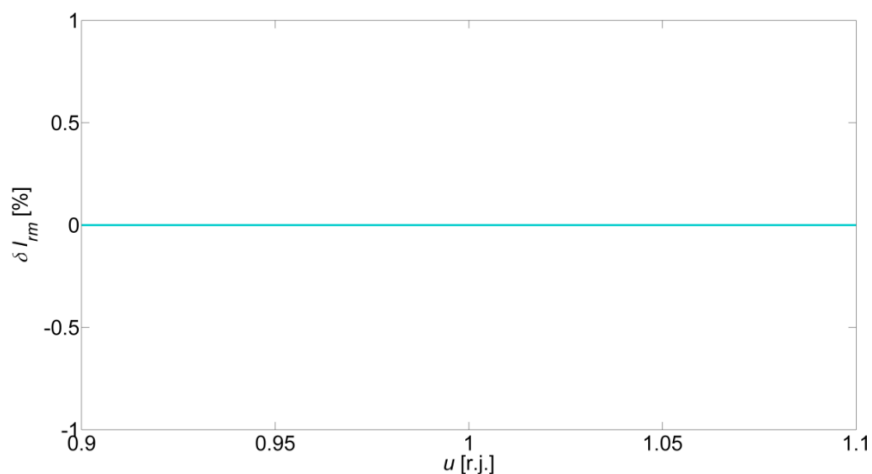
Сл. 5.2.19 R^2 показатељ *ITER* методе приликом варијације напона напајања



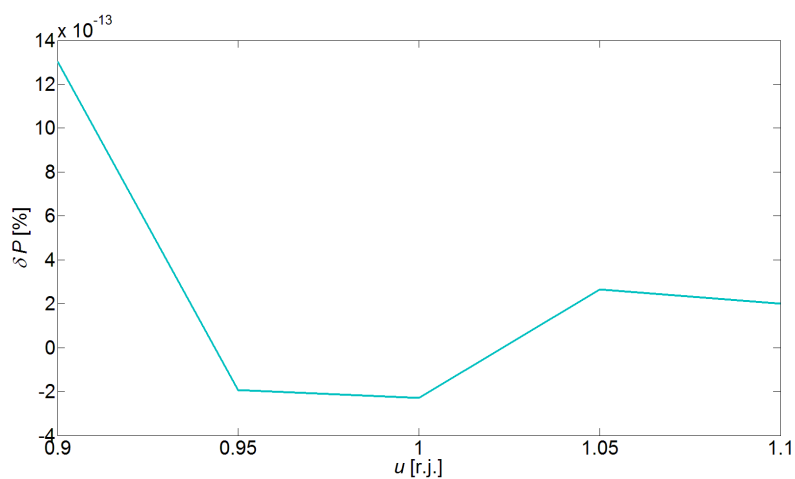
Сл. 5.2.20 R^2 показатељ *GA* методе приликом варијације напона напајања



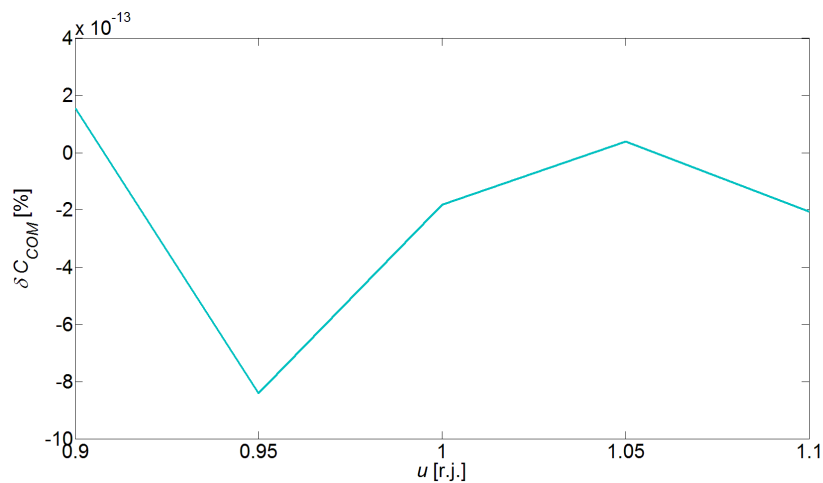
Сл. 5.2.21 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом *HARM* методе приликом варијације напона напајања



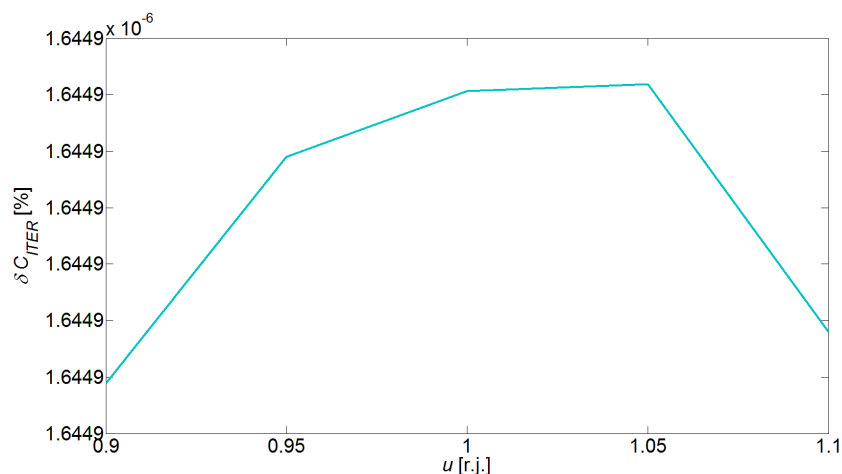
Сл. 5.2.22 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом *DIR* методе приликом варијације напона напајања



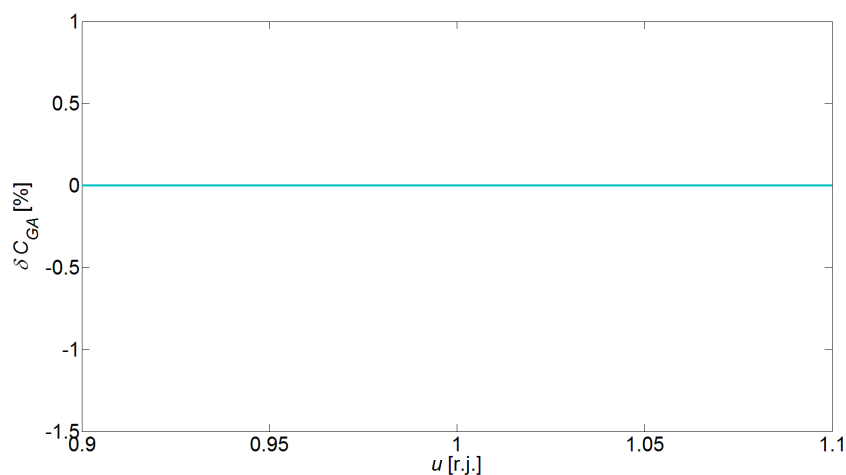
Сл. 5.2.23 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом *P* методе приликом варијације напона напајања



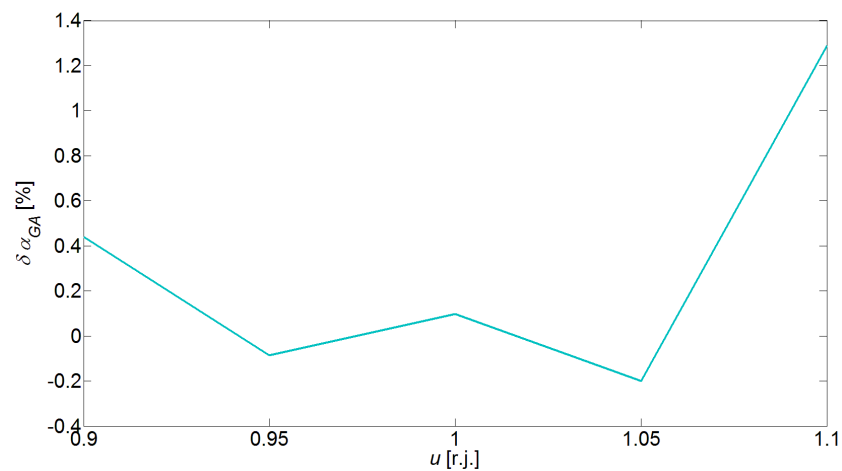
Сл. 5.2.24 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *SOM* методе приликом варијације напона напајања



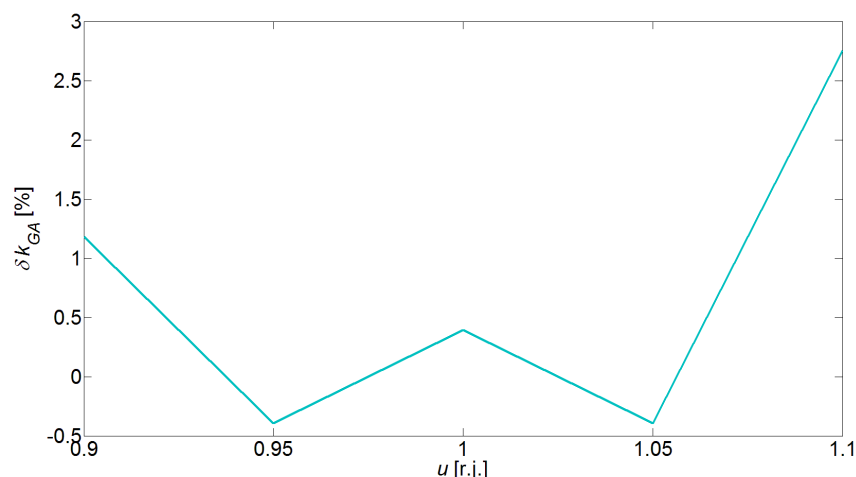
Сл. 5.2.25 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *ITER* методе приликом варијације напона напајања



Сл. 5.2.26 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације напона напајања



Сл. 5.2.27 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације напона напајања

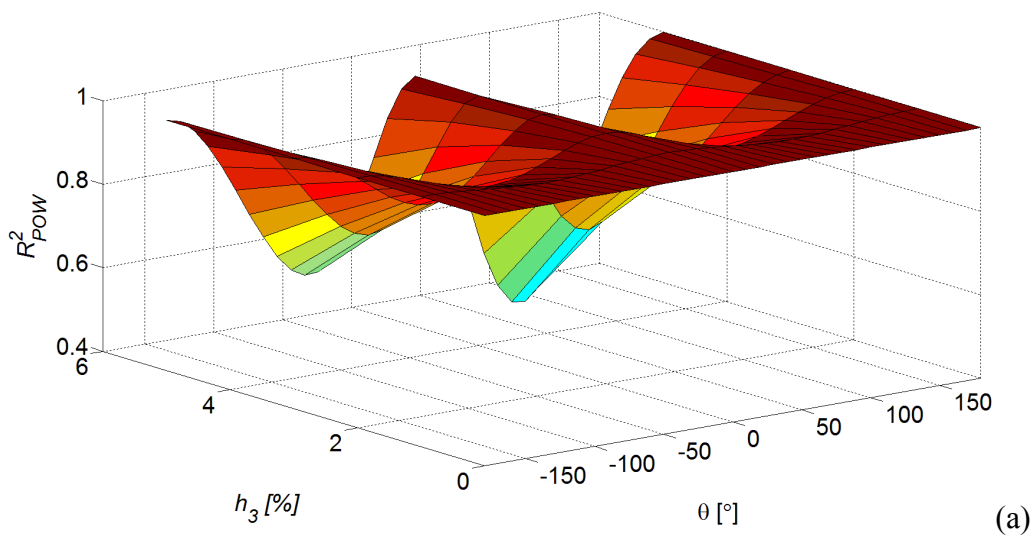


Сл. 5.2.28 Релативна грешка одређивања коефицијента k применом GA методе приликом варијације напона напајања

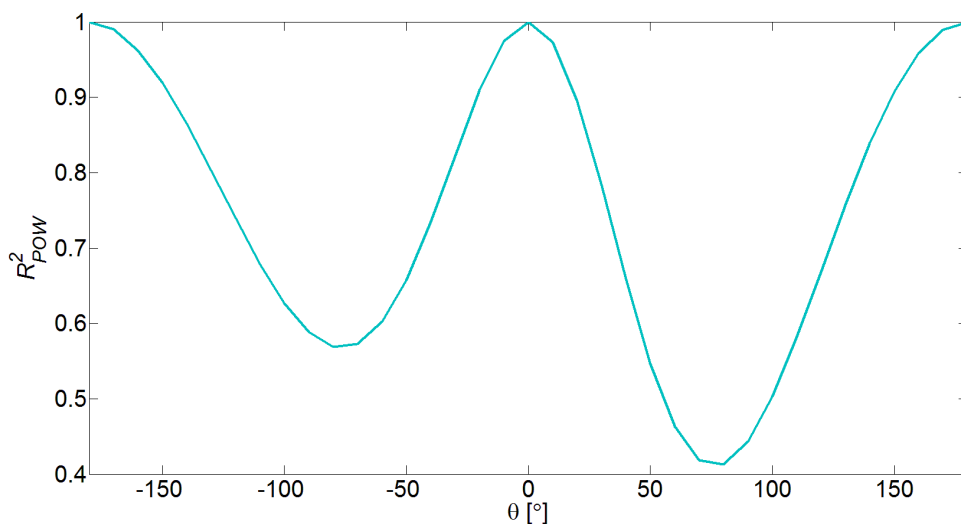
5.2.3 Варирање садржаја хармоника у напону напајања

У оквиру ових анализа је вршено варирање садржаја 3., 5. и 7. хармоника напона напајања у опсегу од 0% до 5%, као и њихових фазних ставова у опсегу од -180° до 180° . Сви параметри МОП-а приликом ових анализа су били као у Таб. 5.1.1. Показатељи грешака који су дефинисани у поглављу 5.2 су одређени за сваку вредност хармоника (са кораком од 1%) и сваки фазни став (са кораком од 10°). На Сл. 5.2.29 - Сл. 5.2.41 су приказани резултати симулација у случају варирања амплитуде и фазног става 3. хармоника напона. За сваку методу су приказани $3D$ дијаграми показатеља грешака, као и $2D$ дијаграм који представља најкритичнији случај, тј. случај у којем се јавља највећа грешка одговарајуће методе. Са Сл. 5.2.29 - Сл. 5.2.41 се може закључити да појава 3. хармоника не утиче на GA , COM и P методу, док остале методе повећавају своју грешку у функцији амплитуде и фазног става 3. хармоника.

Појава 5. и 7. хармоника у напону напајања имају сличан ефекат, али је он знатно мање изражен. Утицај ових хармоника је приказан на дијаграмима у Прилог 3 –Утицај 5. и 7. хармоника напона на грешке метода за мониторинг МОП-а.

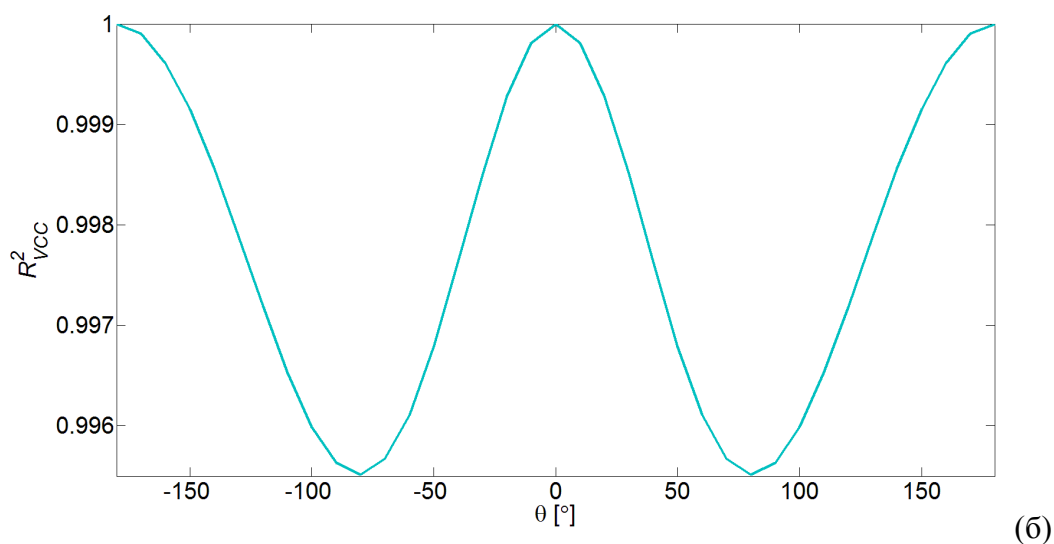
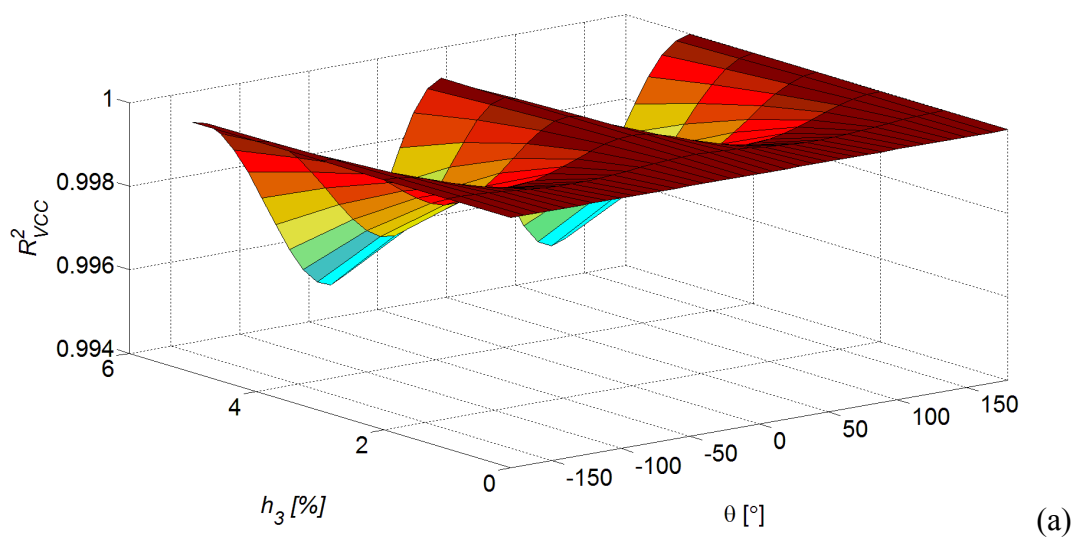


(a)

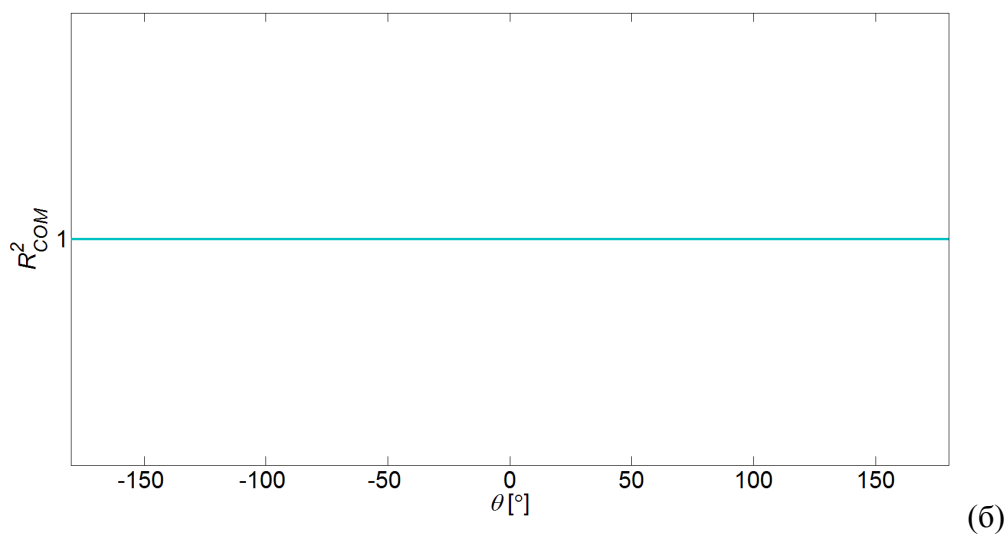
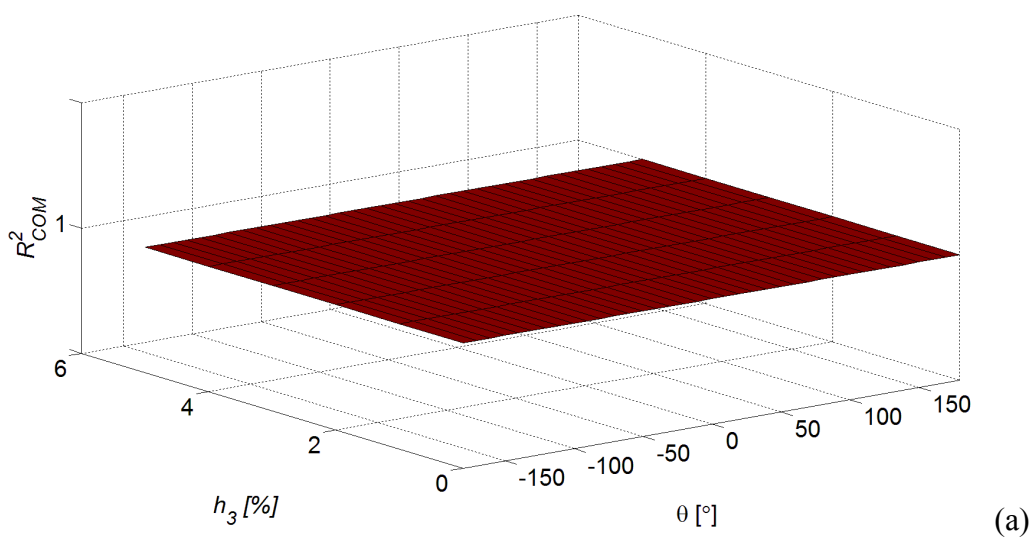


(б)

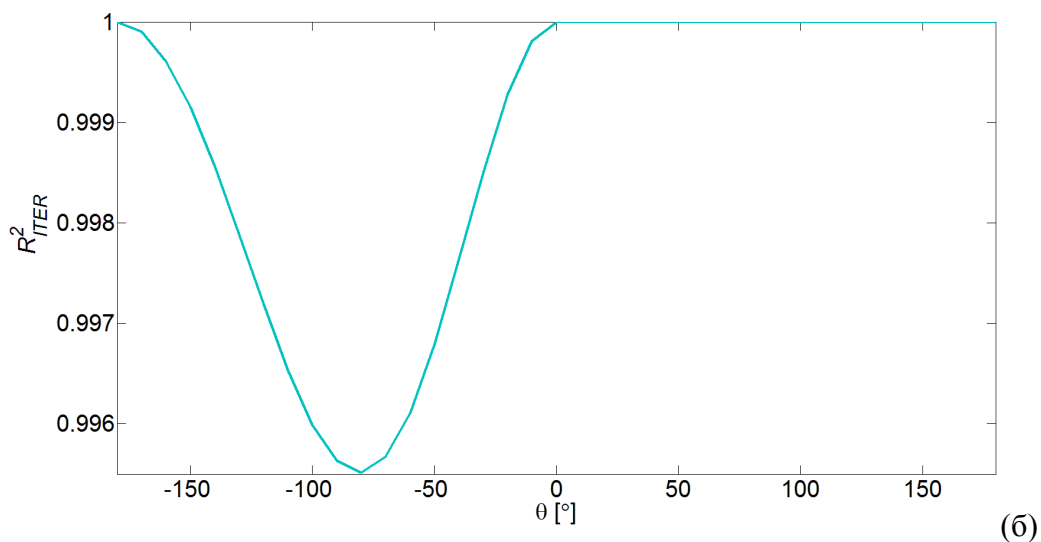
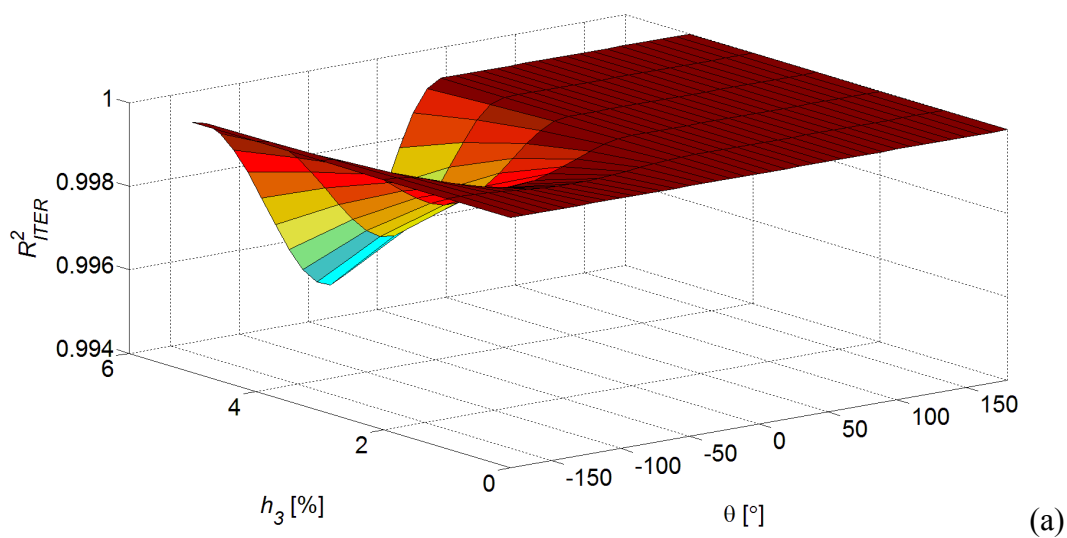
Сл. 5.2.29 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје применом POW методе (a), са приказом најкритичнијег случаја (б)



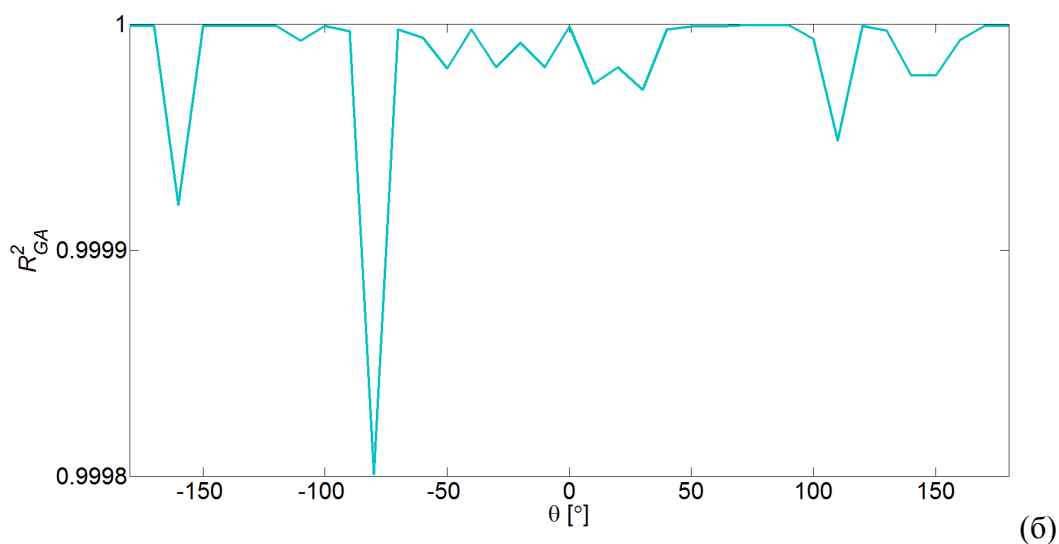
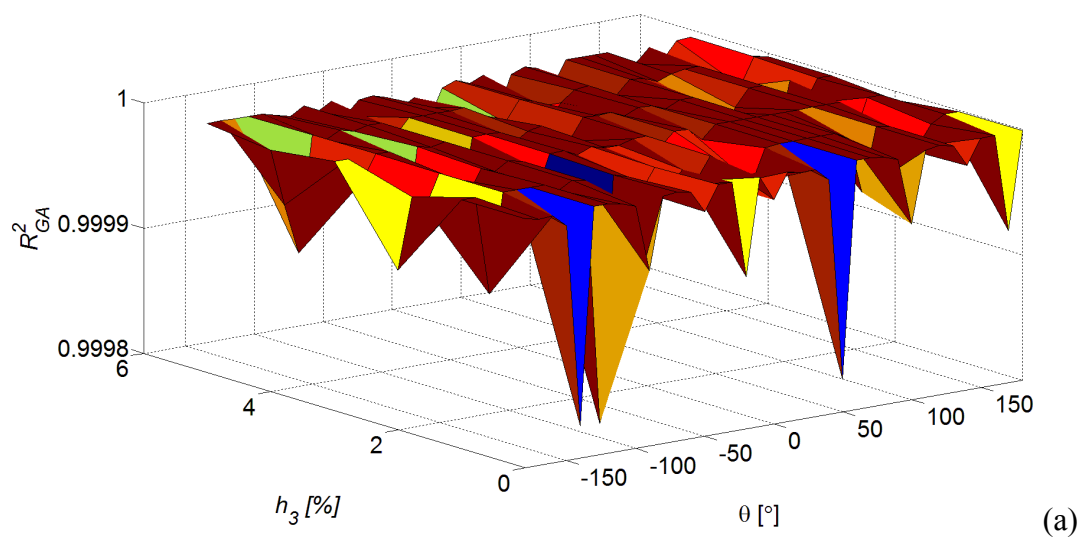
Сл. 5.2.30 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје применом VCC методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



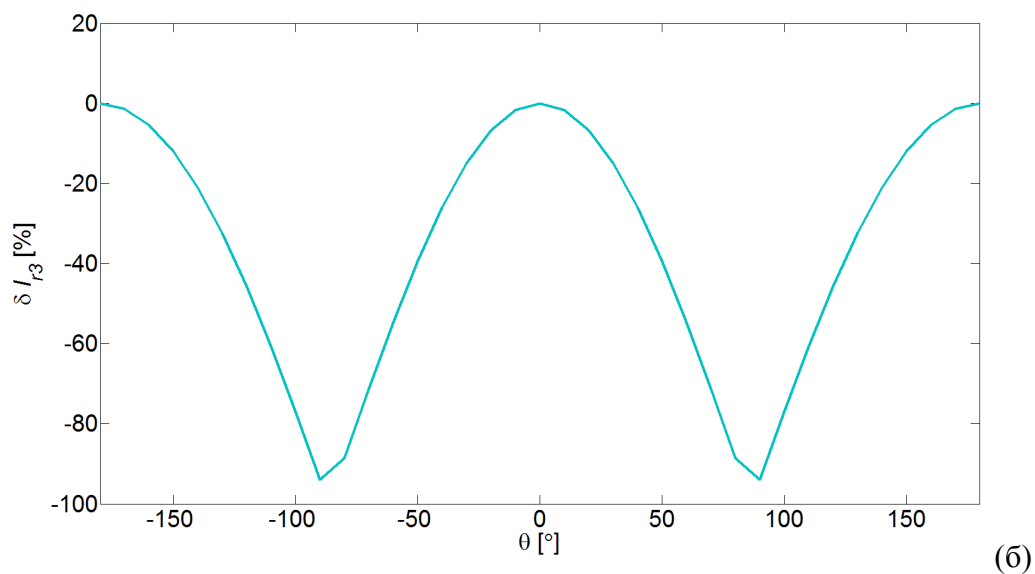
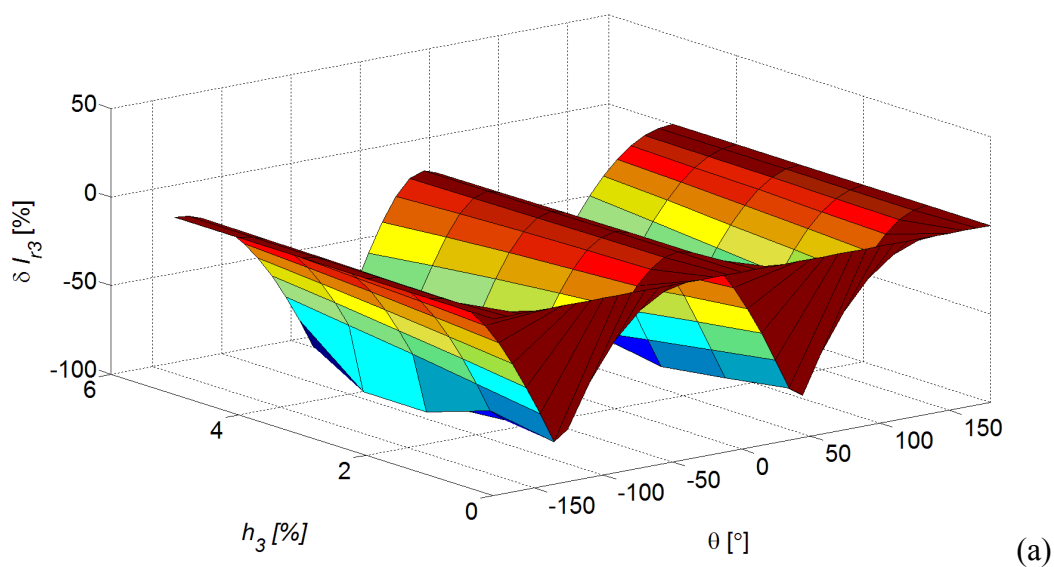
Сл. 5.2.31 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје применом *COM* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



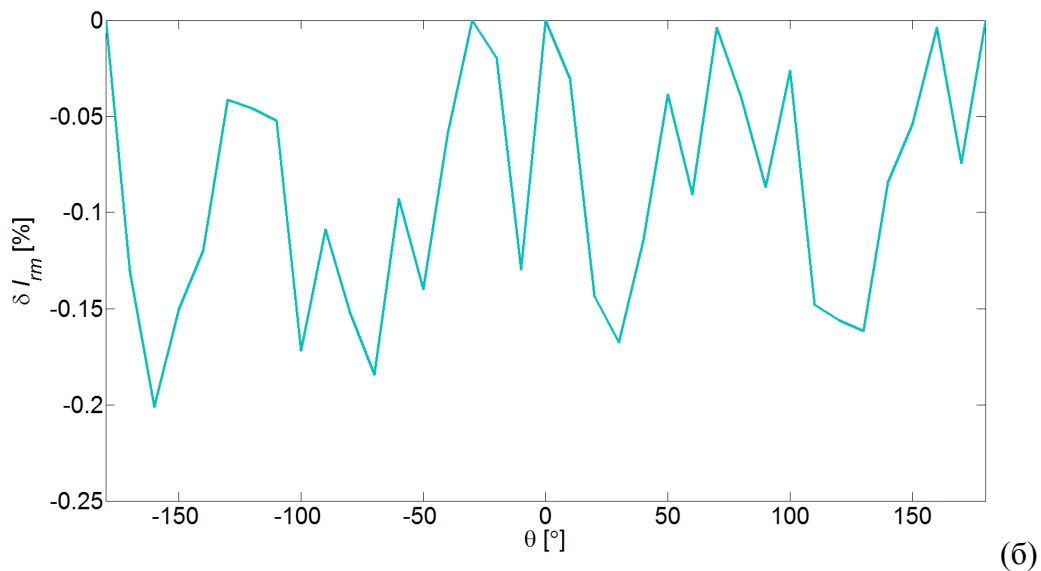
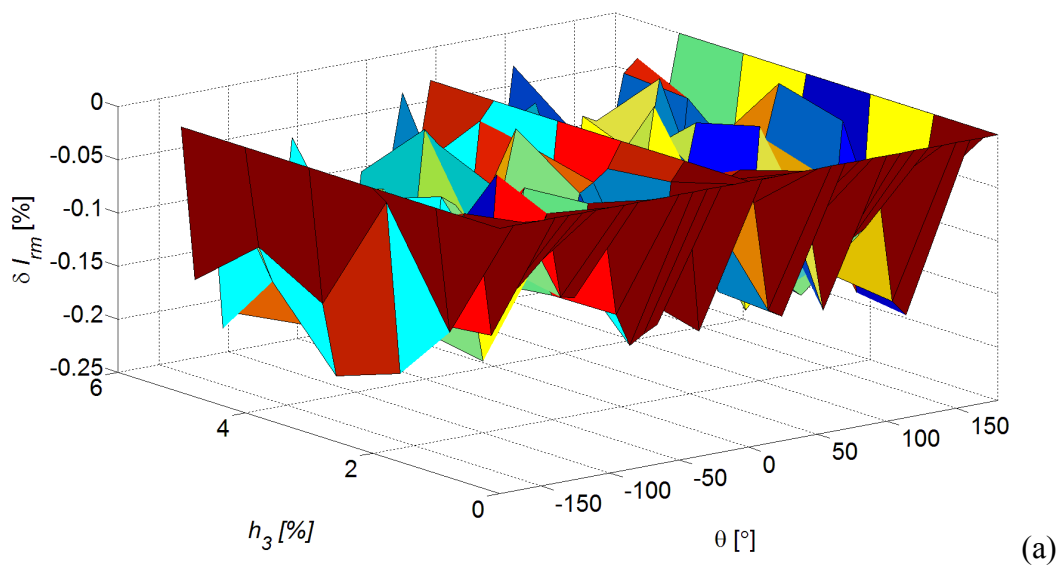
Сл. 5.2.32 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје применом $ITER$ методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



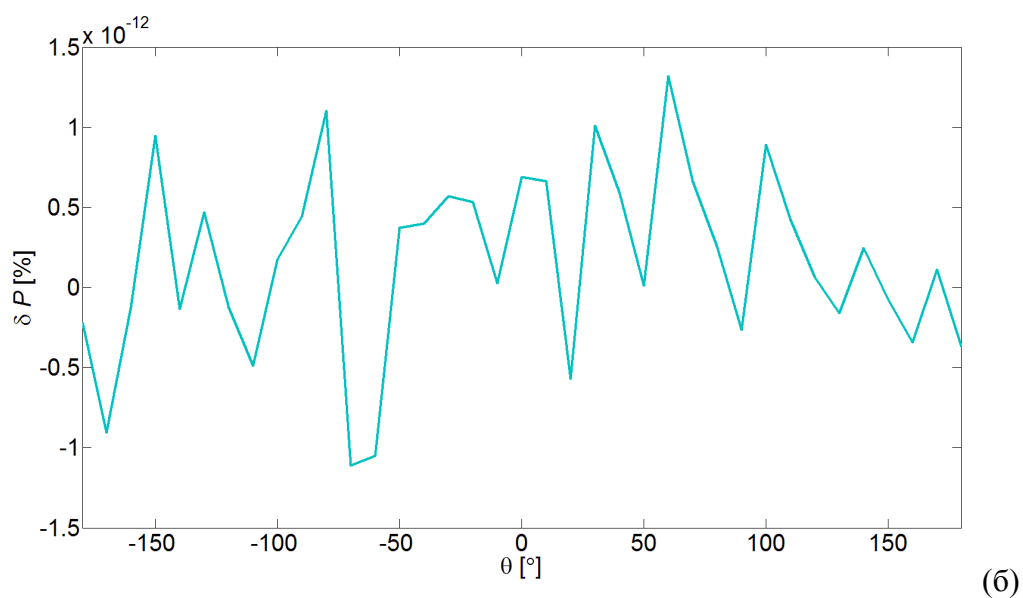
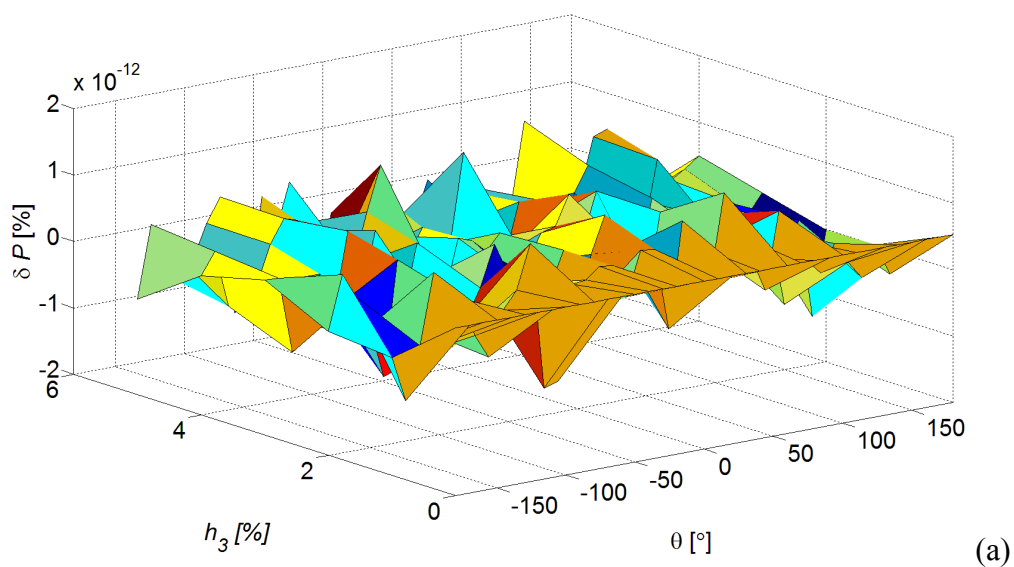
Сл. 5.2.33 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања резистивне струје применом *GA* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



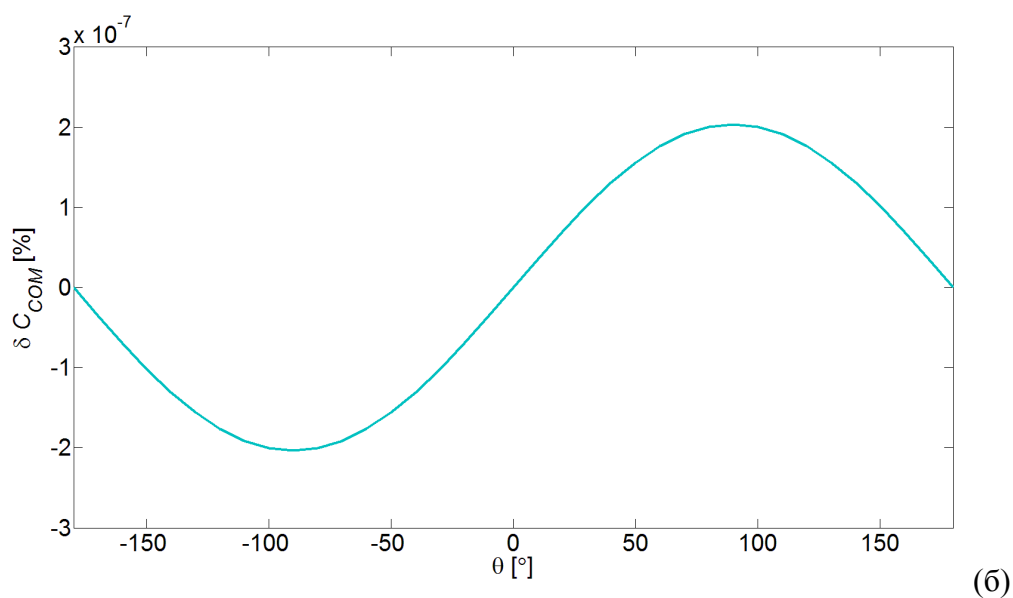
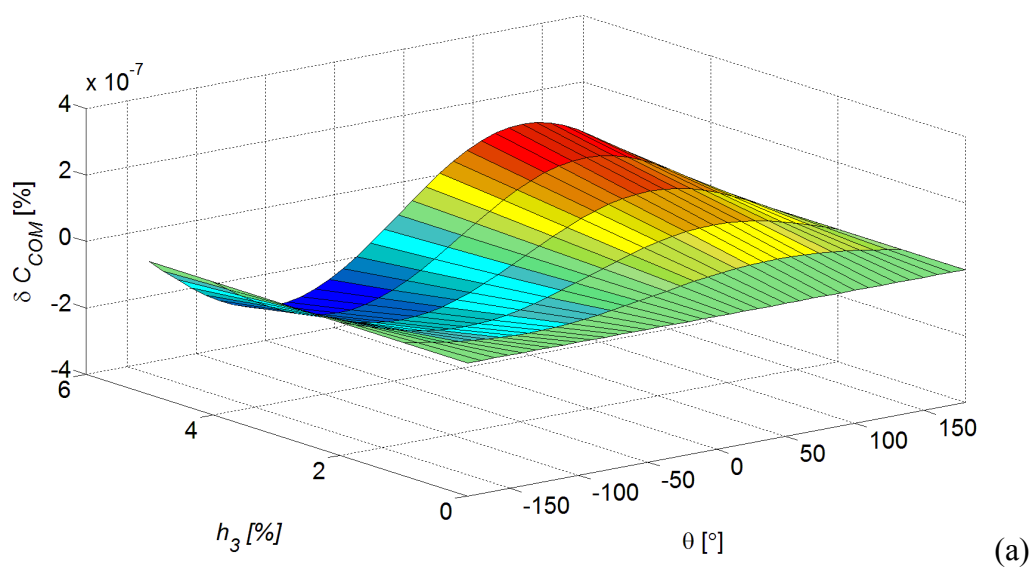
Сл. 5.2.34 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања 3. хармоника резистивне струје применом *HARM* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



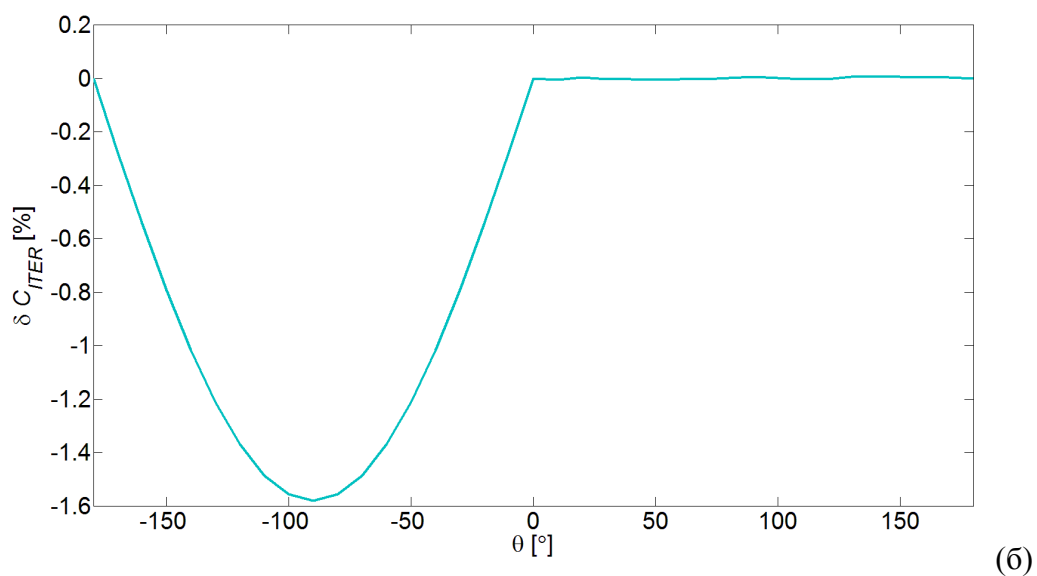
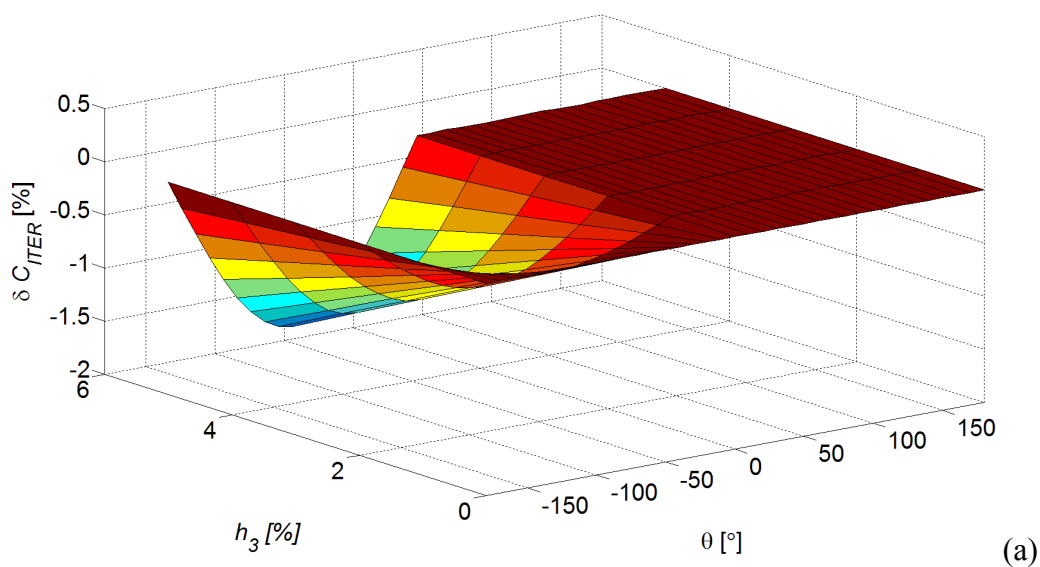
Сл. 5.2.35 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку *DIR* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



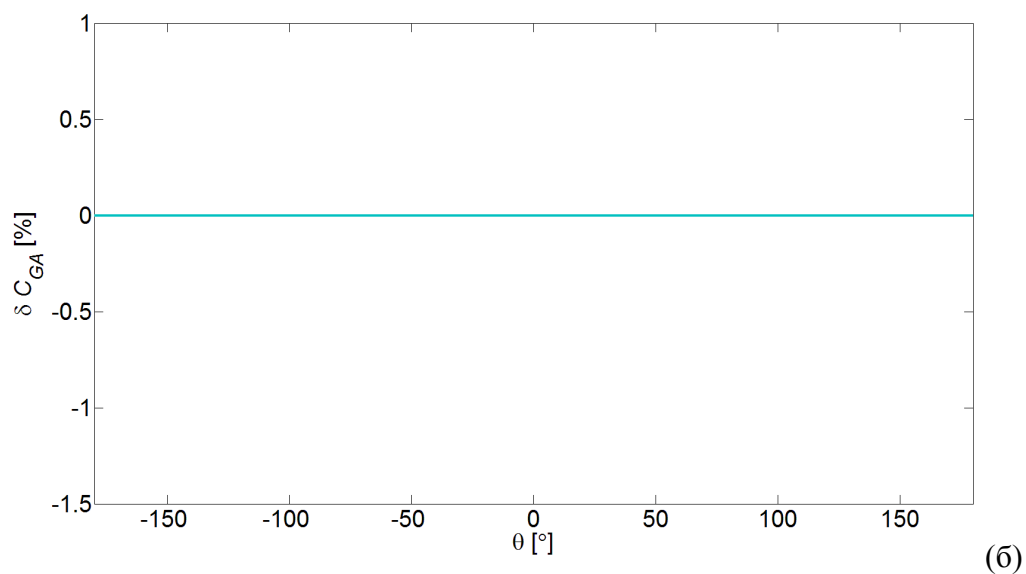
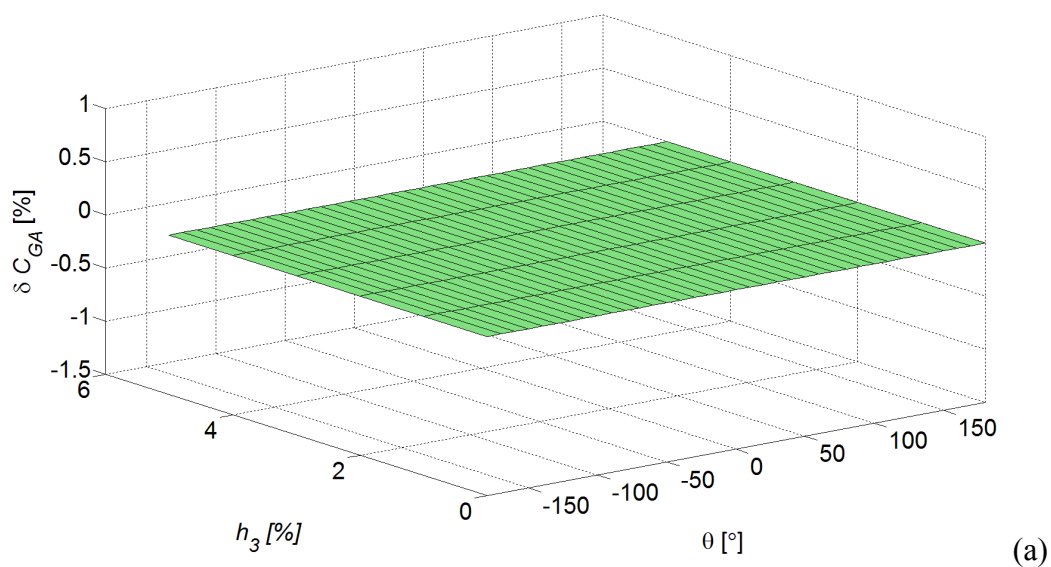
Сл. 5.2.36 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку P методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



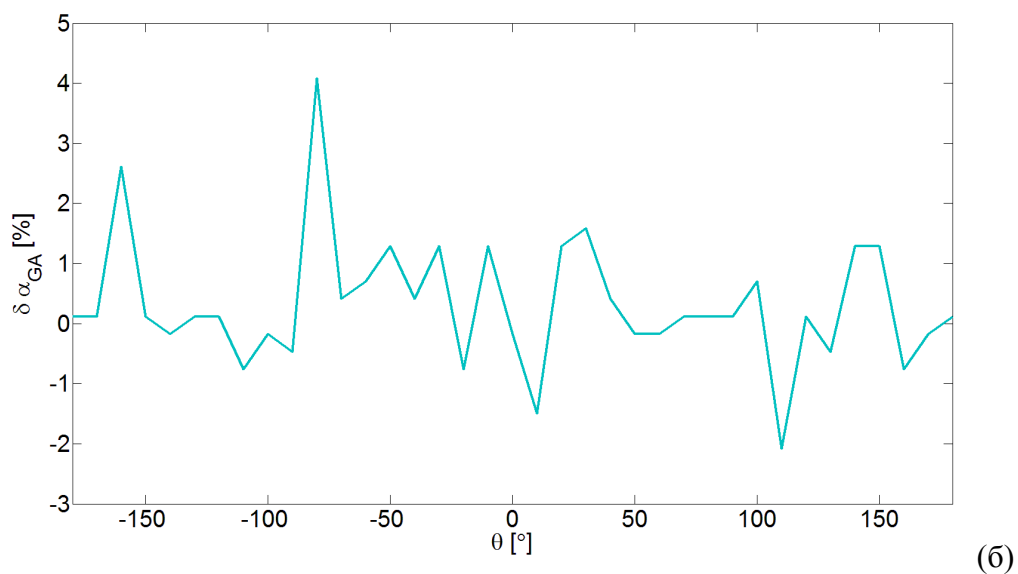
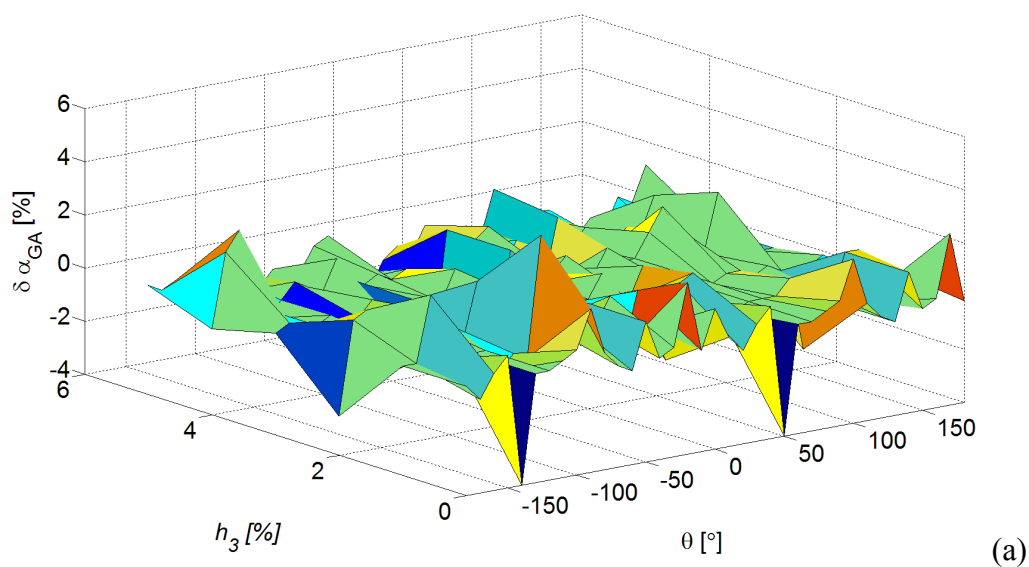
Сл. 5.2.37 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом *COM* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



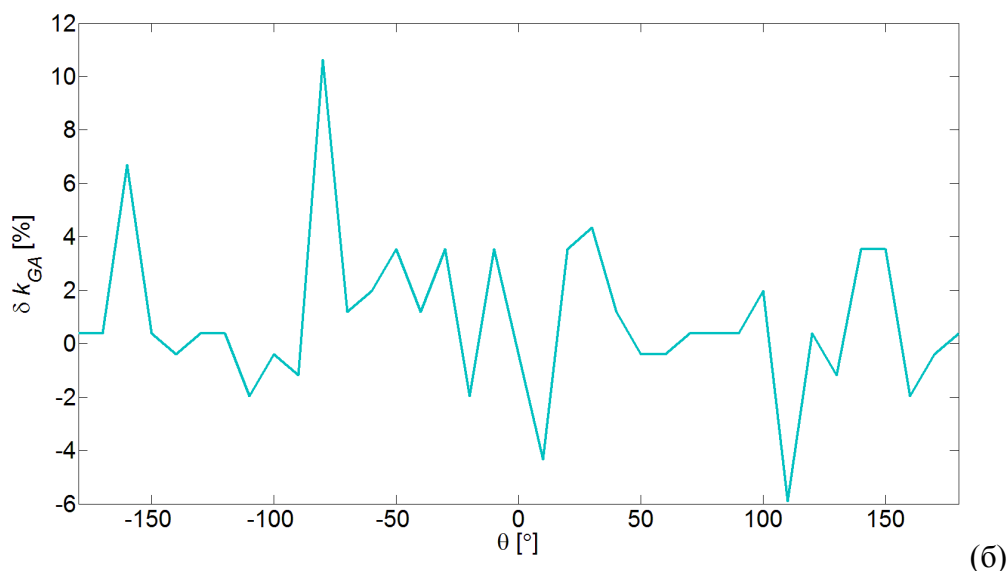
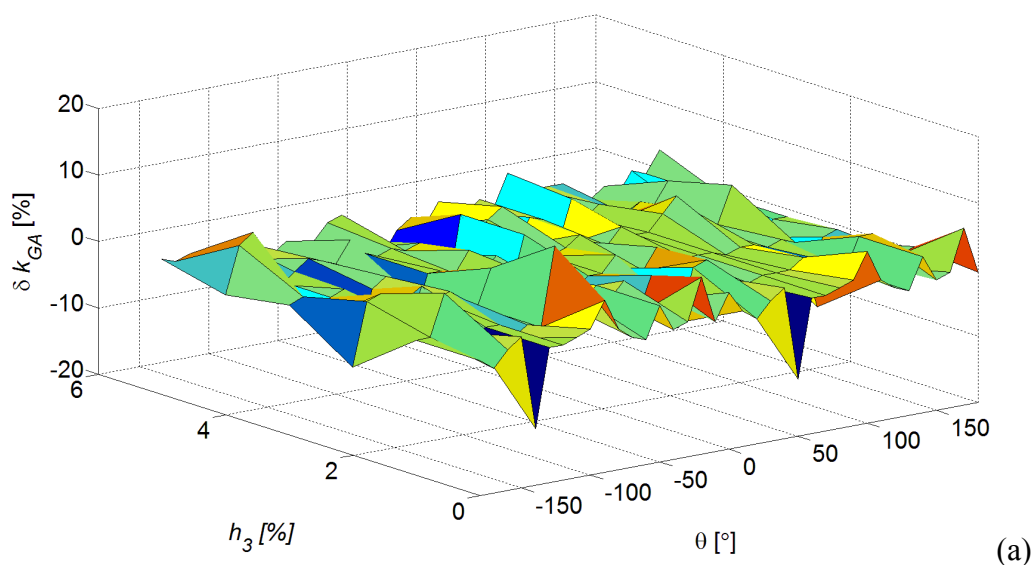
Сл. 5.2.38 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом *ITER* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



Сл. 5.2.39 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања капацитивности МОП-а применом *GA* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)



Сл. 5.2.40 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом *GA* методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)

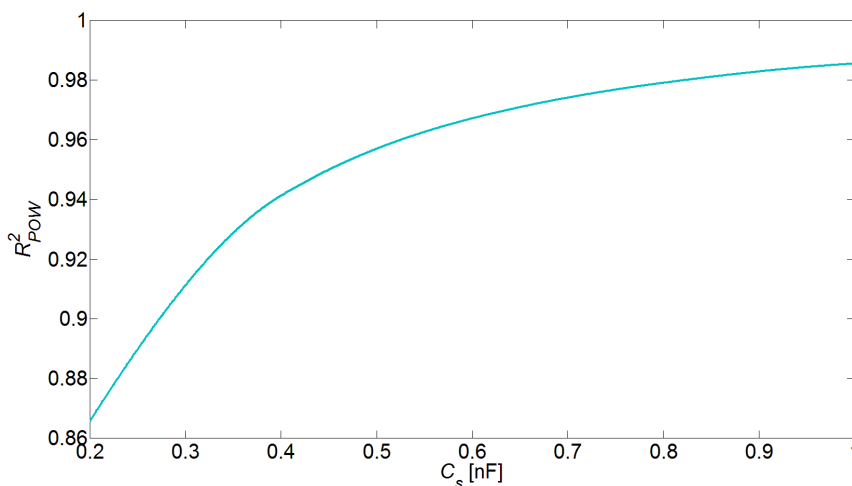


Сл. 5.2.41 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на грешку одређивања коефицијента k применом GA методе (а), са приказом најкритичнијег случаја (б)

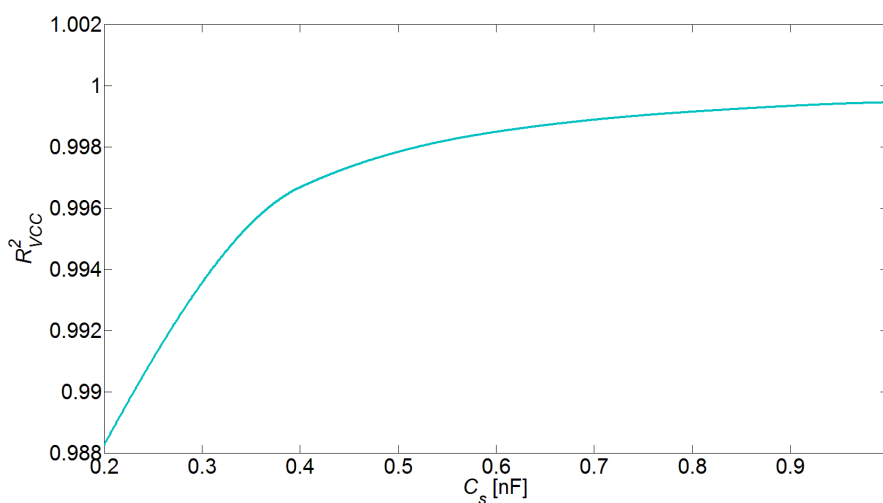
5.2.4 Утицај еквивалентне шеме МОП-а

Као што је речено у поглављу 2.4, показано је у лабораторијским условима да између капацитивне компоненте и нелинеарне компоненте струје одвођења постоји фазни померај који је различит од 90° . На основу детаљних мерења на одводницима водећих произвођача, како на новим тако и на деградираним одводницима, показано је да је тај фазни померај између 77° и 87° за различите типове одводника. Такође је доказано да се ова вредност не мења деградацијом

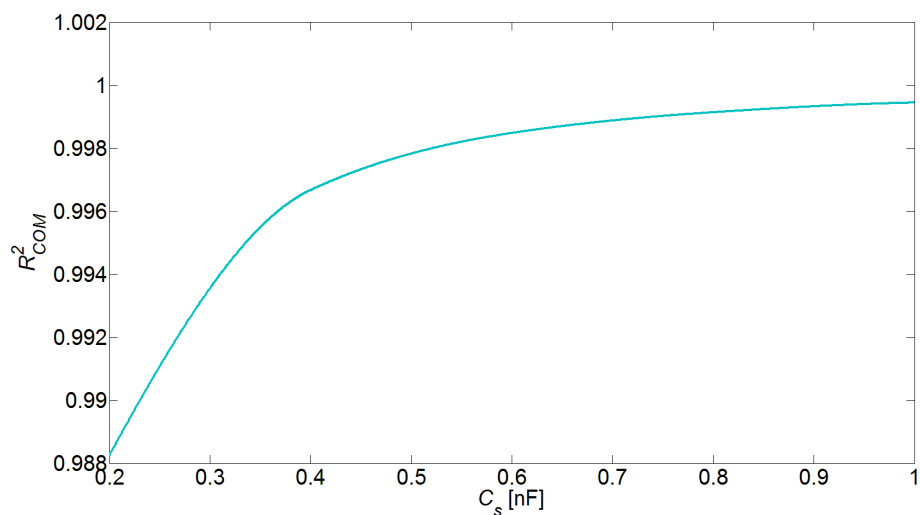
одводника па се самим тим не може користити као индикатор стања МОП-а [1]. Да би се уважио овај ефекат потребно је користити проширен модел МОП-а (Сл. 2.4.5). Међутим све методе, осим *ITER* и *GA* методе, користе упрошћене моделе МОП-а. Дакле, у случају да постоји фазни померај између капацитивне и нелинеарне струје мањи од 90° , може се очекивати да ће ове методе правити већу грешку уколико је тај фазни померај мањи. У циљу анализе варирана је капацитивност C_s проширеног модела МОП-а у опсегу од 0,2 nF до 1 nF, чиме се постиже фазни померај који се налази у дефинисаном опсегу. На Сл. 5.2.42 - Сл. 5.2.46 су приказани R^2 показатељи *POW*, *VCC*, *COM*, *ITER* и *GA* метода. На Сл. 5.2.47 - Сл. 5.2.56 су приказане релативне грешке приликом одређивања релевантних показатеља стања МОП-а у случају варијације капацитивности C_s у дефинисаном опсегу.



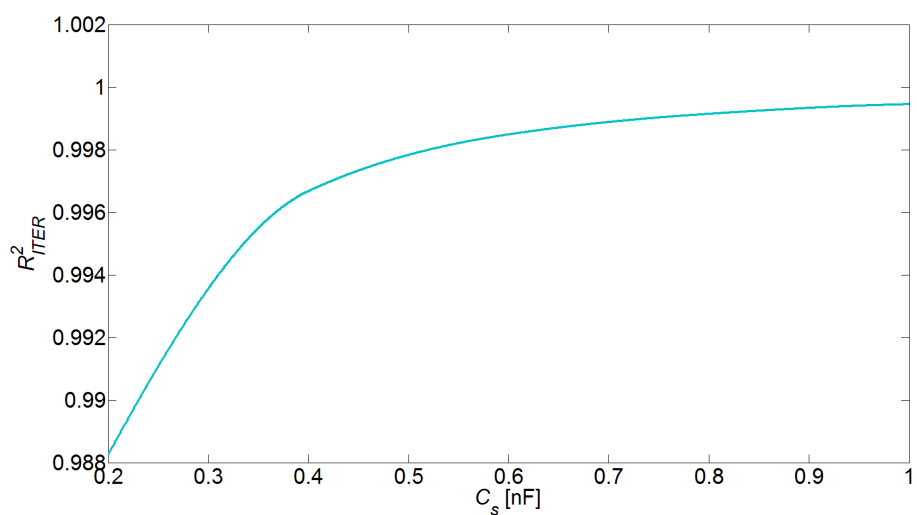
Сл. 5.2.42 R^2 показатељ *POW* методе приликом варијације капацитивности C_s



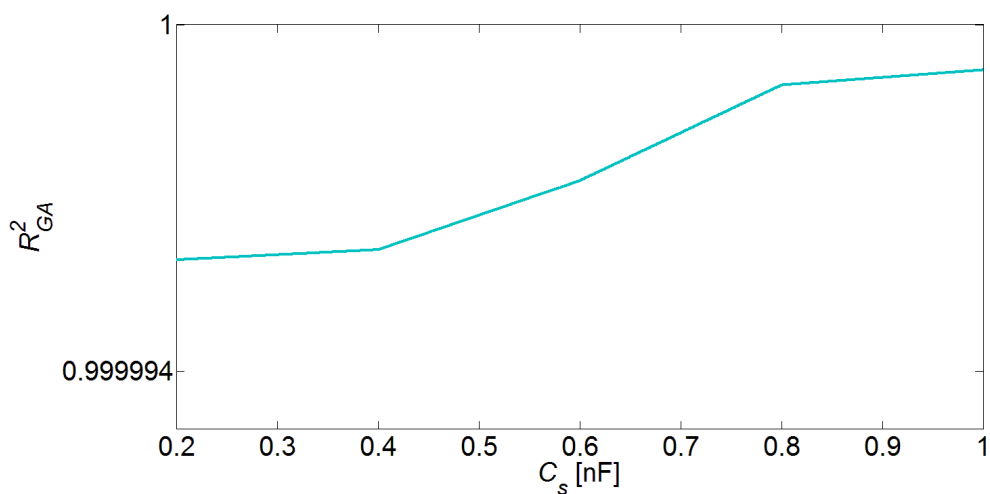
Сл. 5.2.43 R^2 показатељ *VCC* методе приликом варијације капацитивности C_s



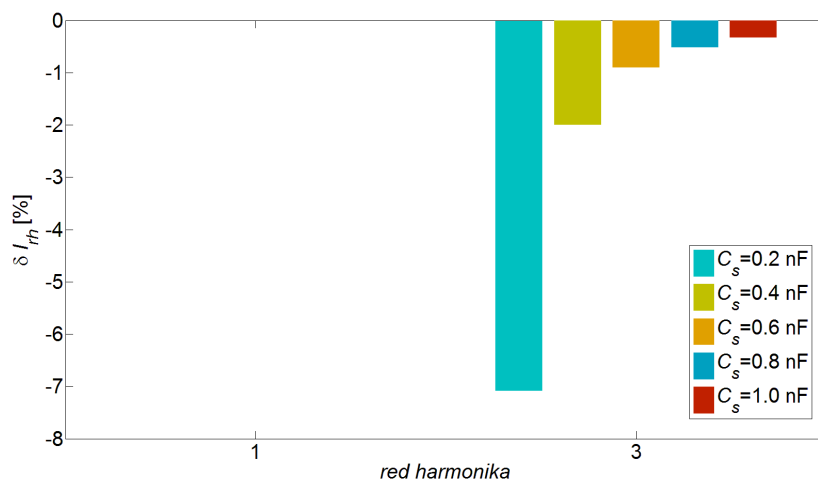
Сл. 5.2.44 R^2 показатељ *COM* методе приликом варијације капацитивности C_s



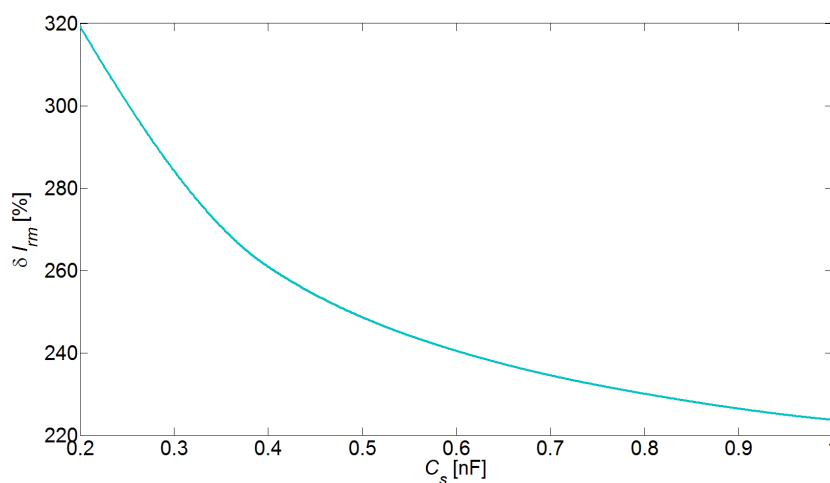
Сл. 5.2.45 R^2 показатељ *ITER* методе приликом варијације капацитивности C_s



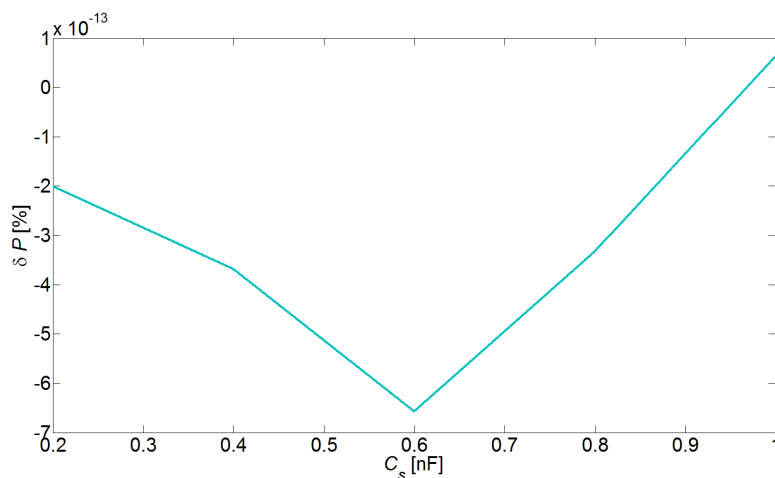
Сл. 5.2.46 R^2 показатељ *GA* методе приликом варијације капацитивности C_s



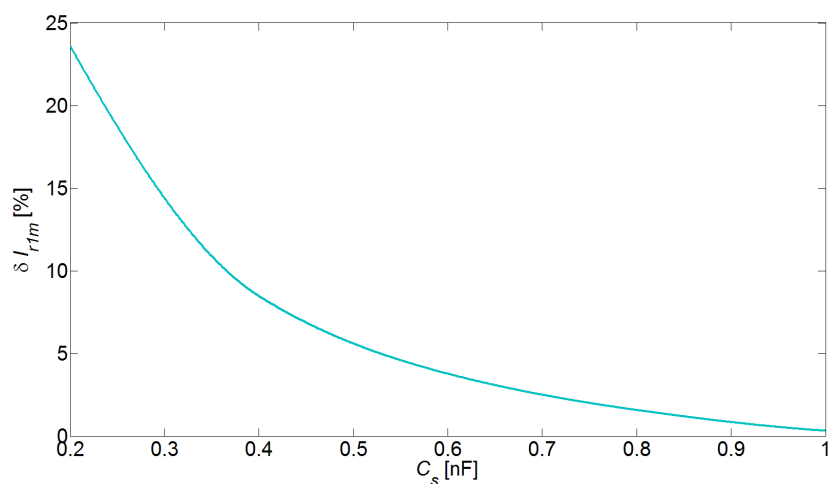
Сл. 5.2.47 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом *HARM* методе приликом варијације капацитивности C_s



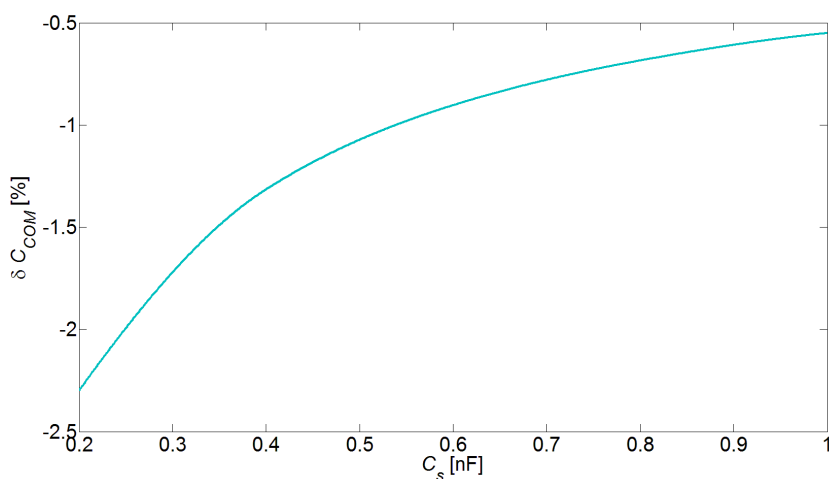
Сл. 5.2.48 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом *DIR* методе приликом варијације капацитивности C_s



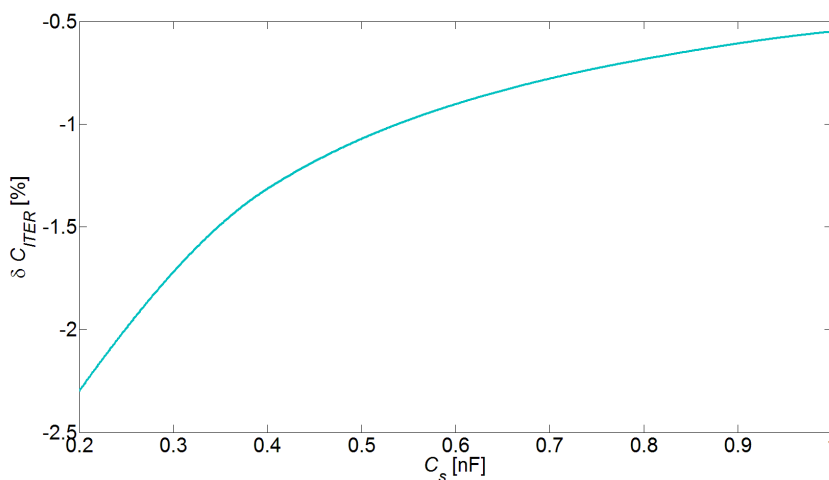
Сл. 5.2.49 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом *P* методе приликом варијације капацитивности C_s



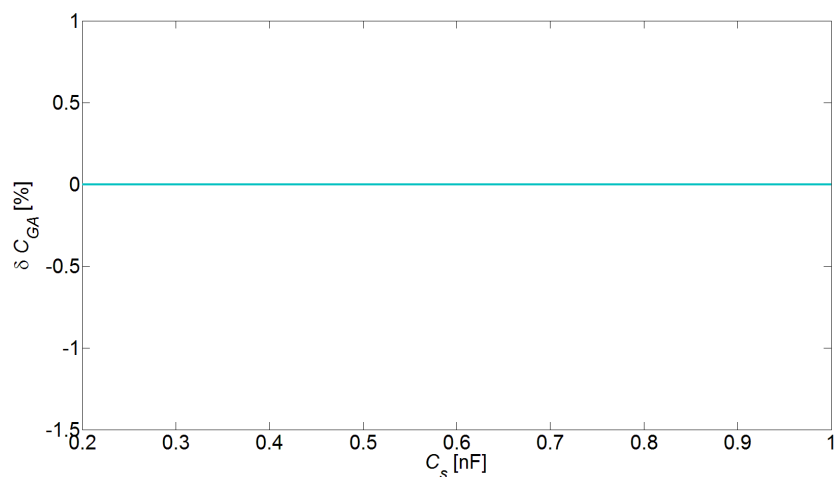
Сл. 5.2.50 Релативна грешка одређивања максималне вредности основног хармоника резистивне струје приликом варијације капацитивности C_s



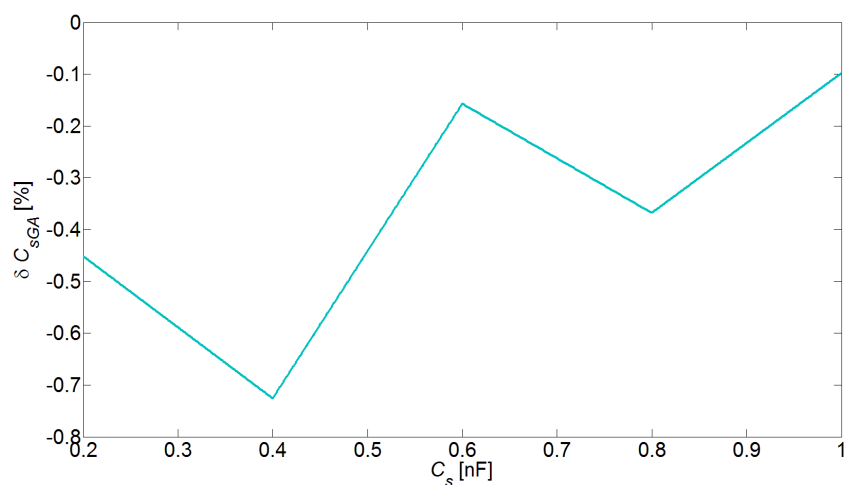
Сл. 5.2.51 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *COM* методе приликом варијације капацитивности C_s



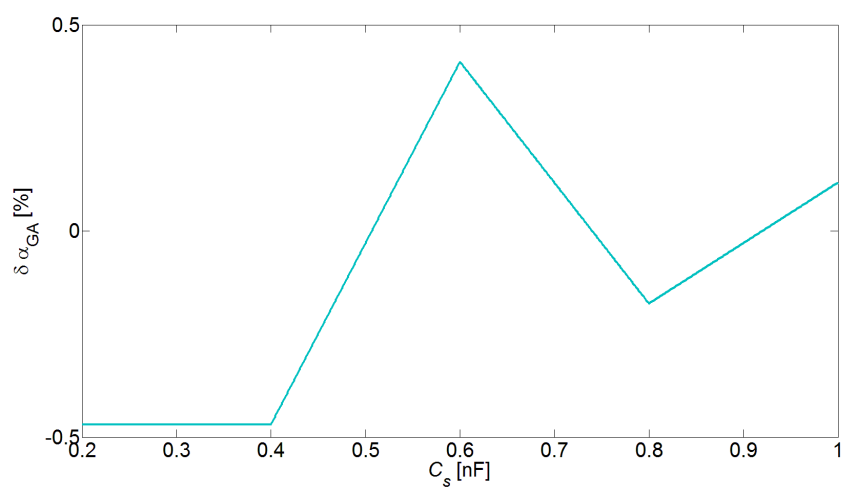
Сл. 5.2.52 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *ITER* методе приликом варијације капацитивности C_s



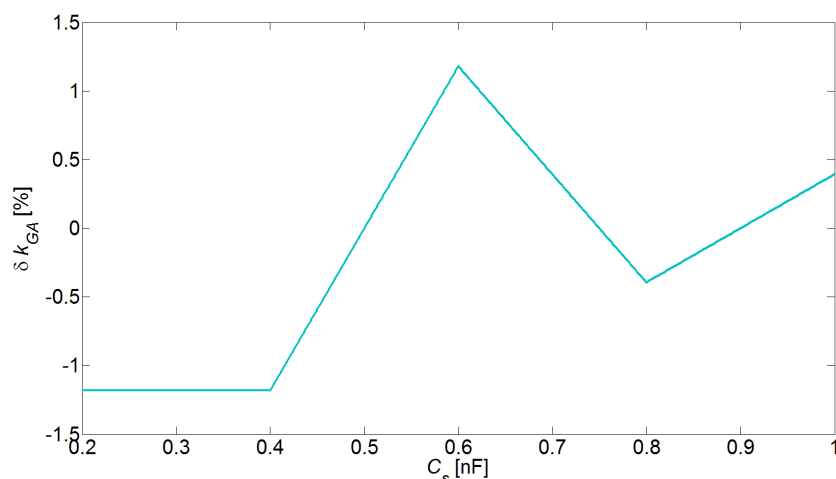
Сл. 5.2.53 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације капацитивности C_s



Сл. 5.2.54 Релативна грешка одређивања капацитивности C_s МОП-а применом *GA* методе приликом варијације капацитивности C_s



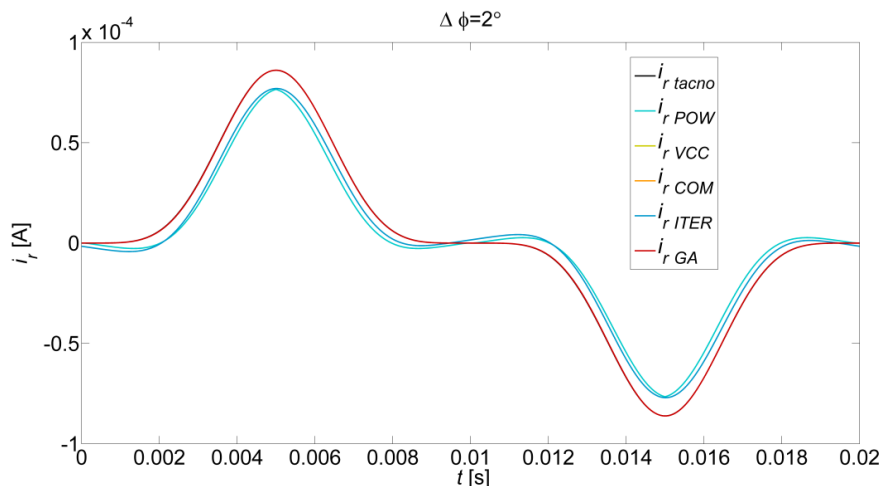
Сл. 5.2.55 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације капацитивности C_s



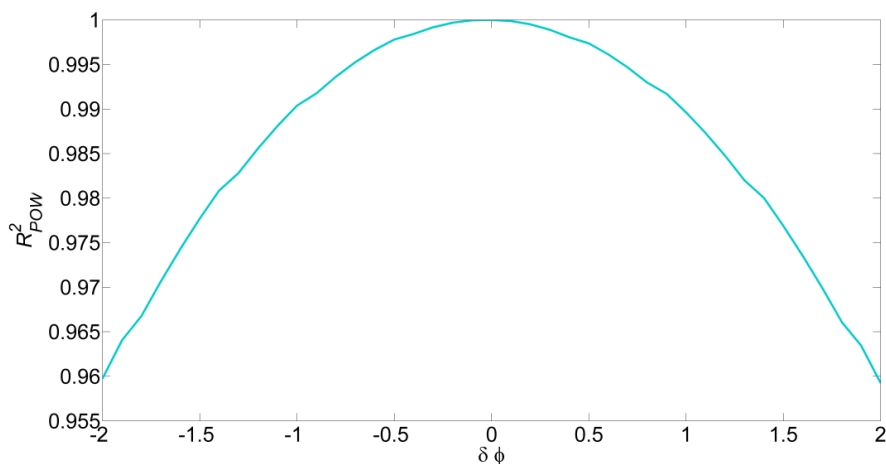
Сл. 5.2.56 Релативна грешка одређивања коефицијента k МОП-а применом GA методе приликом варијације капацитивности C_s

5.2.5 Варирање фазне грешке између напона напајања и укупне струје одвођења

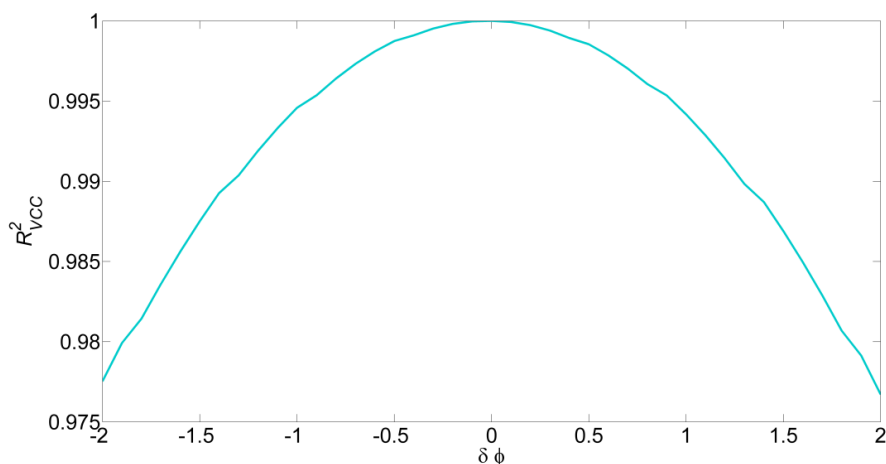
Код метода за мониторинг МОП-а које захтевају синхрона мерења напона напајања и струје одвођења, може се очекивати да у случају постојања фазне грешке мерења (тј. фазног помераја између напона напајања и струје одвођења који није последица самог МОП-а) ове методе праве већу или мању грешку приликом прорачуна показатеља стања МОП-а. Циљ спроведене рачунарске анализе јесте да се квантификују ове грешке у случају варирања фазног помераја између таласних облика напона напајања и струје одвођења у опсегу од -2° до 2° . Као и у претходним анализама прорачунате су грешке R^2 за методе које одређују таласне облике резистивне струје и релативне процентуалне грешке осталих показатеља стања МОП-а. Таласни облици резистивних струја одређених применом POW , VCC , COM , $ITER$ и GA методе у случају када је фазна грешка $\Delta\Phi=2^\circ$ су приказани на Сл. 5.2.57. На Сл. 5.2.57 се поклапају таласни облици VCC , COM и $ITER$ методе, док се резистивна струја одређена GA методом у потпуности поклапа са тачном вредношћу. Ова чињеница се може потврдити дијаграмима на Сл. 5.2.58 - Сл. 5.2.62, који приказују зависност R^2 показатеља у функцији фазне грешке. На основу процентуалних релативних грешака, чији су дијаграми приказани на Сл. 5.2.63 - Сл. 5.2.70, може се закључити да се грешке свих постојећих метода за мониторинг МОП-а повећавају са растом апсолутне вредности фазне грешке између таласних облика напона и струје одвођења, осим GA методе чија је тачност независна од фазне грешке.



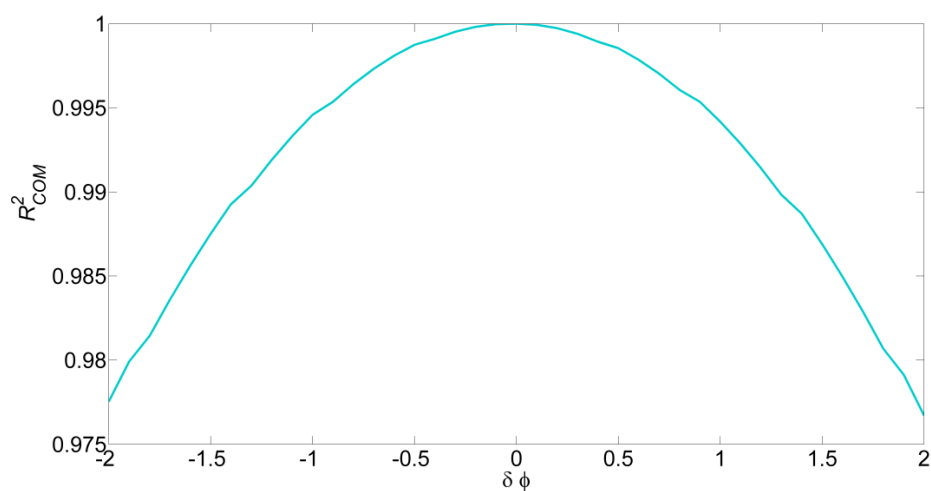
Сл. 5.2.57 Резистивна струја одређена различитим методама при фазној грешци $\Delta\Phi=2^\circ$



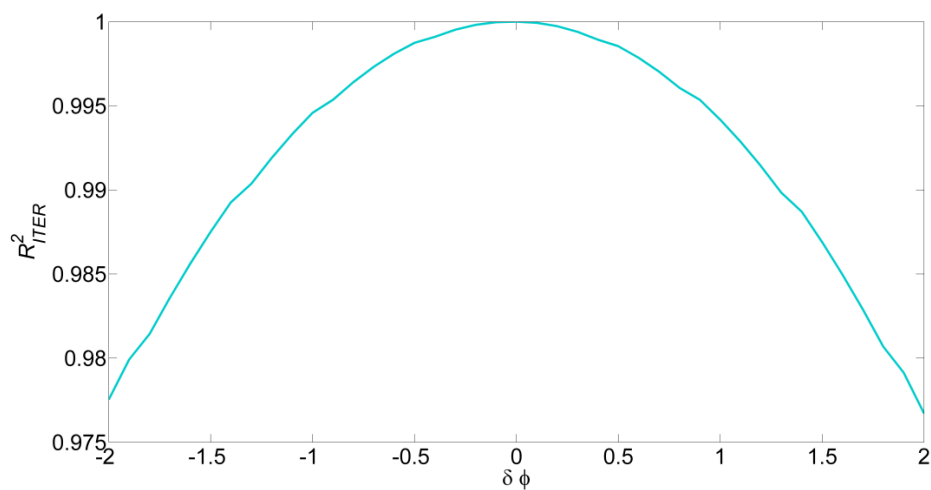
Сл. 5.2.58 R^2 показатељ POW методе приликом варијације фазне грешке



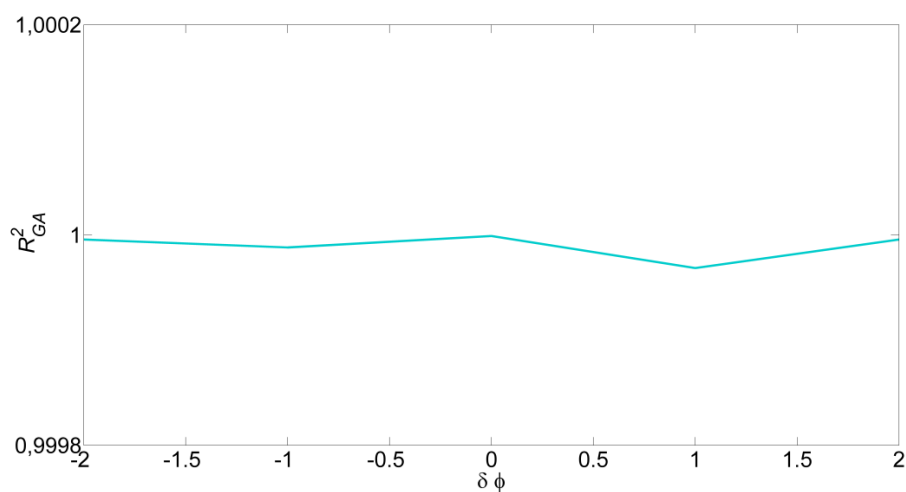
Сл. 5.2.59 R^2 показатељ VCC методе приликом варијације фазне грешке



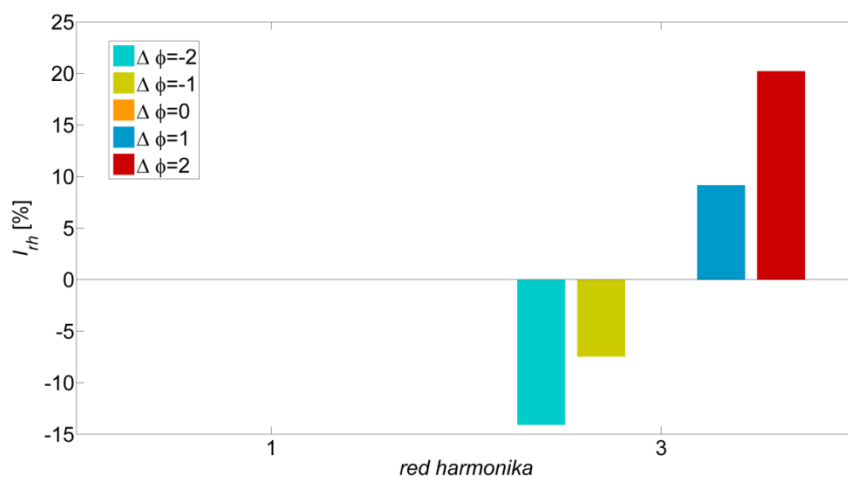
Сл. 5.2.60 R^2 показатељ *COM* методе приликом варијације фазне грешке



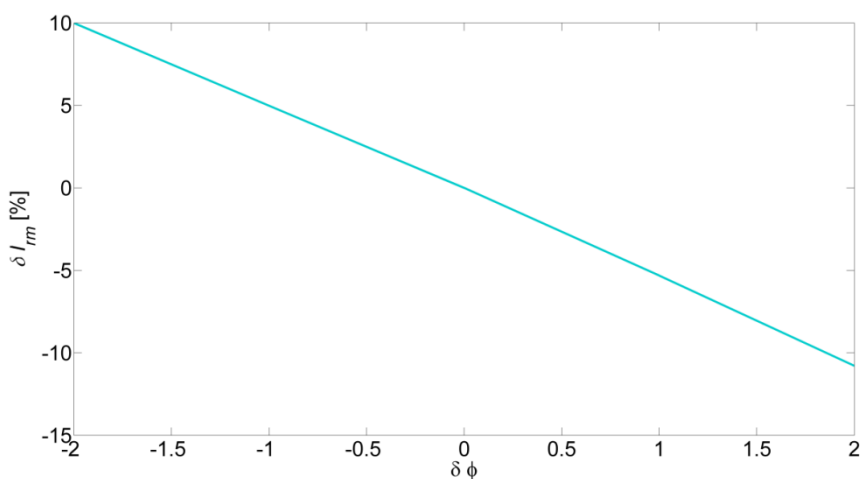
Сл. 5.2.61 R^2 показатељ *ITER* методе приликом варијације фазне грешке



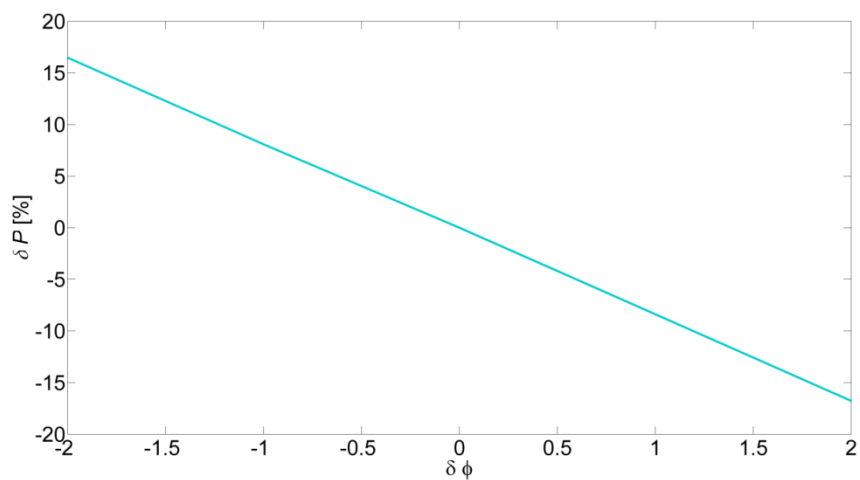
Сл. 5.2.62 R^2 показатељ *GA* методе приликом варијације фазне грешке



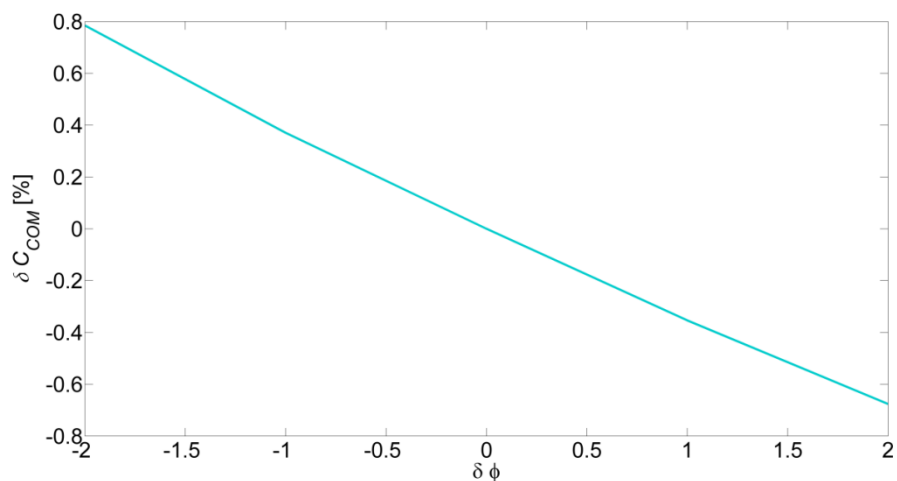
Сл. 5.2.63 Релативна грешка одређивања 1. и 3. хармоника резистивне струје применом *HARM* методе приликом варијације фазне грешке



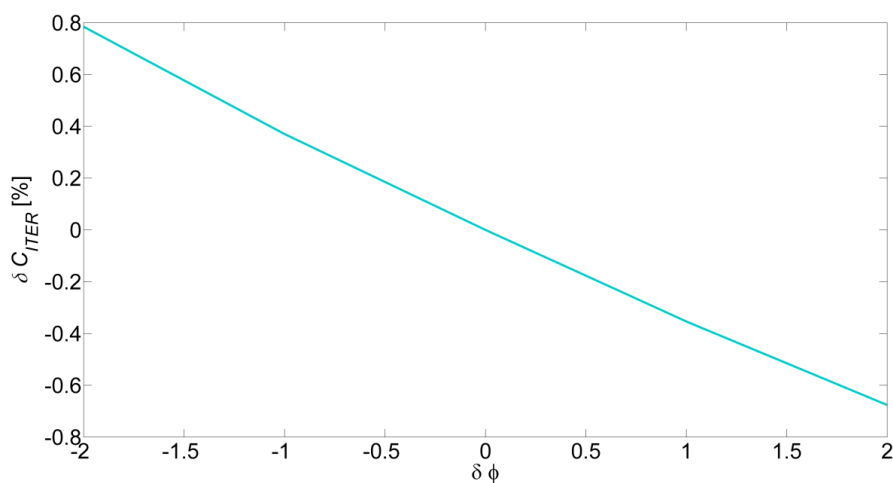
Сл. 5.2.64 Релативна грешка одређивања максималне вредности резистивне струје применом *DIR* методе приликом варијације фазне грешке



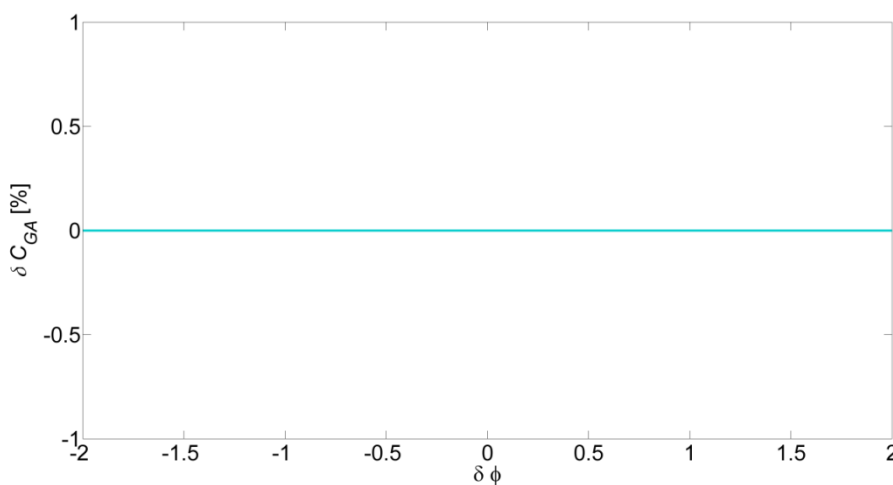
Сл. 5.2.65 Релативна грешка одређивања активне снаге губитака применом *P* методе приликом варијације фазне грешке



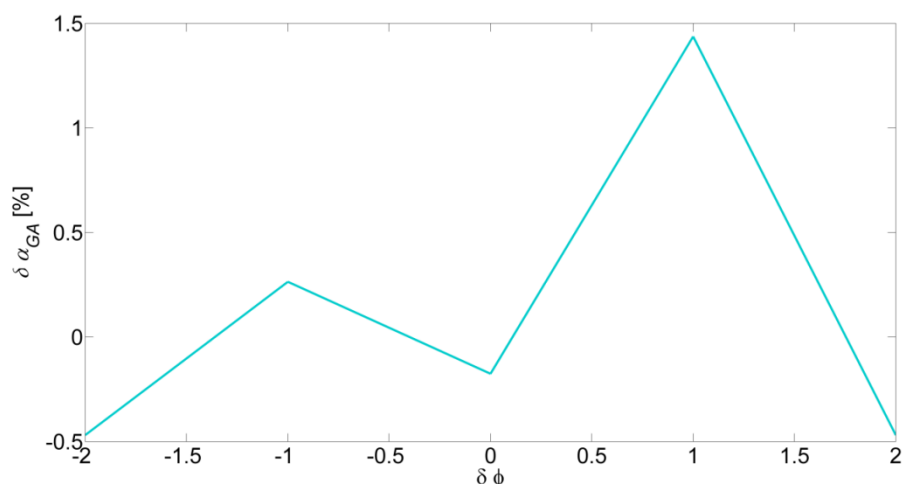
Сл. 5.2.66 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *COM* методе приликом варијације фазне грешке



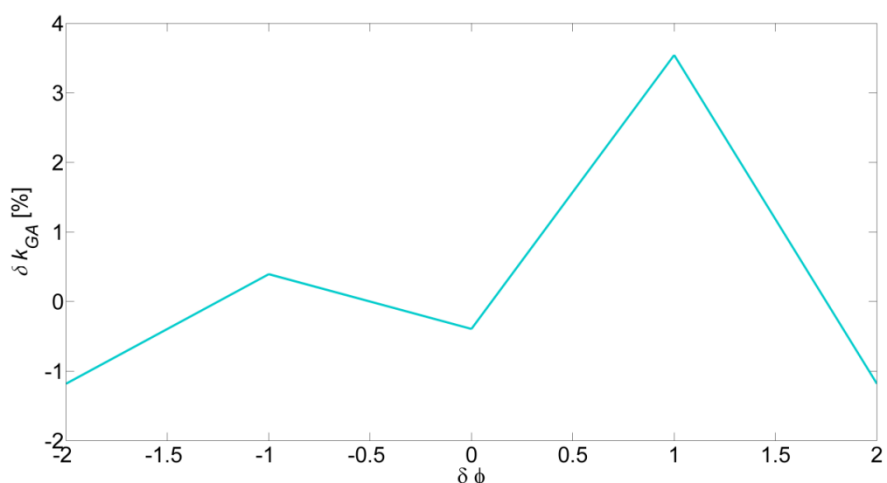
Сл. 5.2.67 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *ITER* методе приликом варијације фазне грешке



Сл. 5.2.68 Релативна грешка одређивања капацитивности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације фазне грешке



Сл. 5.2.69 Релативна грешка одређивања коефицијента нелинеарности МОП-а применом *GA* методе приликом варијације фазне грешке



Сл. 5.2.70 Релативна грешка одређивања коефицијента k применом *GA* методе приликом варијације фазне грешке

5.2.6 Дискусија резултата симулација

У симулацијама описаним у оквиру овог поглавља је извршена анализа тачности метода за мониторинг МОП-а у случају промене стања МОП-а и услова напајања са аспекта колебања напона и промене амплитуда и фазних ставова виших хармоника напона напајања. Такође је анализиран утицај модела МОП-а и фазних грешака мерних трансформатора, тј. несинхроног мерења напона и струје одвођења. Након спроведених анализа могу се извести следећи закључци:

- Грешке метода у случају промене стања одводника су занемарљиве. Највеће грешке се јављају код одређивања коефицијента нелинеарности α (-1,22%) и коефицијента k (2,76%) применом *GA*

методе. Међутим, може се уочити да је појава ових грешака независна од стања МОП-а, на основу чега се закључује да су грешке последица самог генетског алгоритма. Варирањем величине популације и броја генерација у оквиру *GA* методе и ове грешке је могуће смањити.

- У случају флукуације напона у опсегу од 0,9 г.ј. до 1,1 г.ј. такође се може закључити да су грешке метода за мониторинг МОП-а занемарљиве. Грешке *GA* методе приликом одређивања коефицијената k и α су у истом опсегу као и у случају промене стања одводника. Такође се не може уочити зависност ових грешака од промене напона напајања.
- У случају појаве виших хармоника напона напајања могу се уочити јасне зависности грешака *POW*, *VCC*, *ITER* и *HARM* метода у функцији промене амплитуде и фазног става виших хармоника. Методе које и у овом случају имају занемарљиву грешку, односно не показују јасну зависност су *COM*, *DIR*, *P* и *GA* методе. Анализом дијаграма на Сл. 5.2.40 и Сл. 5.2.41, може се закључити да су изгледи дијаграма грешака одређивања коефицијената k и α применом *GA* методе идентични. Такође се може приметити да у неколико случајева ове грешке имају вредности које су доста веће од средње вредности грешака у комплетном опсегу амплитуда и фазних ставова виших хармоника напона. Из свега реченог се може закључити да не постоји зависност *GA* методе од виших хармоника напона. Такође је потребно напоменути да су приказани дијаграми резултат једног циклуса *GA* и могу се очекивати бољи резултати променом параметара *GA* и покретањем симулације неколико пута.
- У случају увођења проширеног модела варирањем капацитивности C_s , може се закључити да *POW*, *VCC*, *COM* и *ITER* методе показују смањење показатеља R^2 са смањењем капацитивности. Једино *GA* метода не показује никакву зависност у случају коришћења проширеног модела са аспекта одређивања таласног облика резистивне струје. Што се тиче показатеља стања који се одређују применом *HARM* и *DIR* метода, такође се може уочити повећање релативне

грешке у случају смањења капацитивности C_s . Метода активне снаге, као и GA метода не показује никакву зависност од капацитивности C_s . Што се тиче грешака одређивања капацитивности C_s и коефицијената k и α применом GA методе, може се приметити да су дијаграми идентичног облика и независни од капацитивности C_s .

- У случају несинхроног мерења напона и струје, тј. појаве фазне грешке мерења, може се приметити јасна зависност грешака свих метода осим GA методе. Очекивано, што је фазна грешка већа, то су и грешке метода веће. Што се тиче грешака одређивања коефицијената k и α применом GA методе, и у овом случају се може приметити да су дијаграми идентичног облика и независни од фазне грешке. Тиме се још једном потврђује да грешке потичу искључиво од самог генетског алгоритма. Резултат добијен у оквиру ове анализе представља једну од главних предности GA методе. Овом анализом је показано да у случају примене GA методе није потребно синхроно мерење напона и струје одвођења.

Грешке свих метода за мониторинг МОП-а за свих пет анализираних случајева су приказане у Таб. 5.2.1. У случају да постоји јасна зависност грешака од варијације одговарајућих величина приказане су максималне апсолутне вредности грешке које се јављају. Међутим, код метода код којих не постоји зависност грешака од варијације одговарајућих величина, имајући у виду да су у том случају грешке стохастичке, приказана је средња апсолутна вредност грешке. У случају GA , алгоритам се лако може покренути неколико пута и изабрати оно коначно решење које има најбољу вредност објективне функције, а самим тим и најмању грешку.

Таб. 5.2.1 Грешке метода за мониторинг МОП-а у зависности од промене услова напајања, модела МОП-а и фазне грешке

Метод	грешке	Варијација коэф. нелин.	Колебање напона	Варијација 3. хармоника напона	Утицај модела МОП-а	Утицај фазне грешке
HARM	δI_{r1} [%]	0	0	0	0	0
	δI_{r3} [%]	~0	~0	94	7,08	20,23
DIR	δI_{rm} [%]	0	0	0,09	319,30	10,79
P	δP [%]	~0	~0	~0	~0	16,78
ITER	R^2	1	1	0,99	0,99	0,98
	δC [%]	~0	~0	1,58	2,30	0,78
POW	R^2	~1	1	0,41	0,86	0,96
VCC	R^2	1	1	0,99	0,99	0,98
COM	R^2	1	1	1	0,99	0,98
	δC [%]	~0	~0	~0	2,30	0,78
GA	R^2	~1	~1	~1	~1	~1
	δC [%]	0	0	0	0	0
	$\delta \alpha$ [%]	0,56	0,42	0,75	0,33	0,56
	δk [%]	1,46	1,02	2,03	0,87	1,34

5.3. Анализа поузданости показатеља стања МОП-а

Циљ анализе поузданости показатеља стања МОП-а јесте да покаже колико су поједини показатељи осетљиви на промену стања МОП-а као и да се анализира како услови напајања МОП-а утичу на поједине показатеље стања, а самим тим доводе и до могуће погрешне интерпретације резултата. Постоје два основна принципа којима се могу дефинисати добри показатељи стања МОП-а:

1. Велика осетљивост на промену стања МОП-а,
2. Занемарљива осетљивост на промену услова напајања.

Анализе су спроведене за следеће показатеље стања који се одређују описаним методама за мониторинг МОП-а:

1. Основни хармоник укупне струје одвођења,
2. Трећи хармоник укупне струје одвођења,

3. Основни хармоник резистивне струје одвођења,
4. Трећи хармоник резистивне струје одвођења,
5. Активна снага губитака,
6. Максимална вредност резистивне струје одвођења,
7. Коефицијент нелинеарности МОП-а.

Све анализе су извршене у три различита случаја:

1. Варирање коефицијента нелинеарности МОП-а у опсегу од $\alpha=2$ до $\alpha=6$, чиме се симулира промена стања одводника,
2. Варирање ефективне вредности напона напајања у опсегу од $u=0,9$ г.ј. до $u=1,1$ г.ј., чиме се симулира колебање напона,
3. Варирање садржаја 3., 5. и 7. хармоника напона напајања у опсегу од 0% до 5%, као и њихових фазних ставова у опсегу од -180° до 180° .

Симулације су спроведене за параметре одводника дефинисане у Таб. 5.1.1, али уз ту допуну да је случај 2 симулиран за два опсега коефицијента нелинеарности:

1. $\alpha=3\div 4$ који је усвојен као деградиран МОП,
2. $\alpha=4\div 5$ који је усвојен као нов МОП,

док је случај 3 симулиран за две вредности коефицијента нелинеарности:

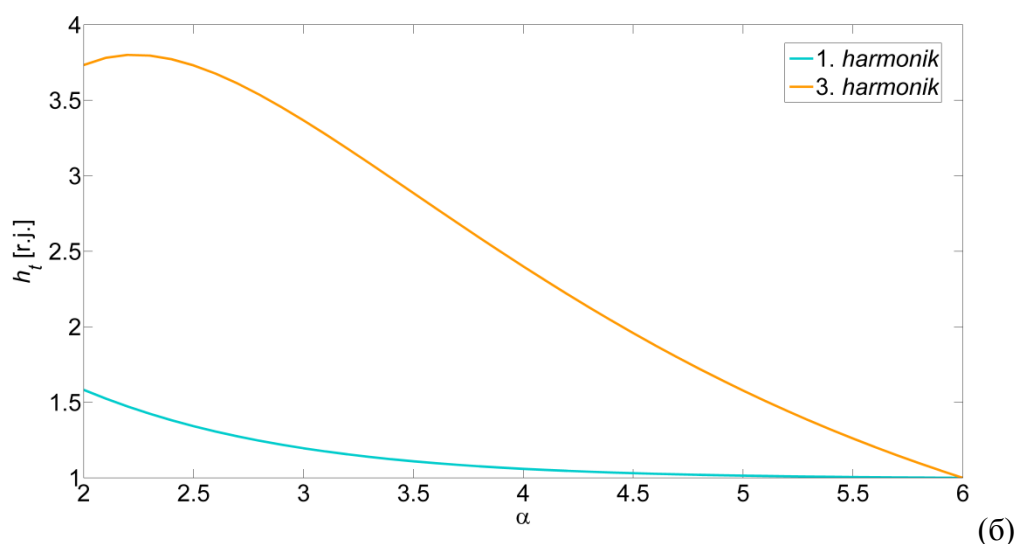
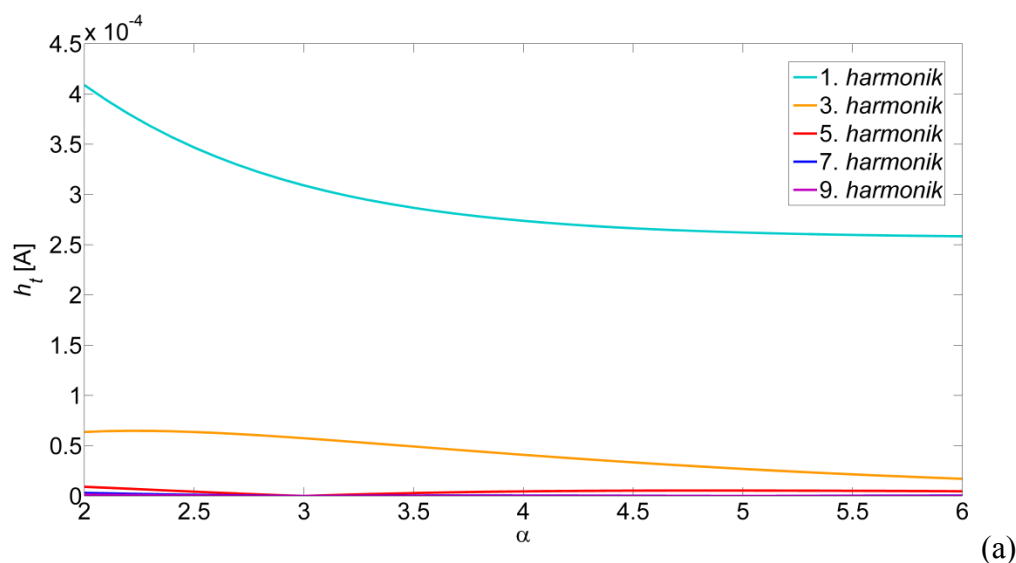
1. $\alpha=3,4$ који је усвојен као деградиран МОП,
2. $\alpha=4,7$ који је усвојен као нов МОП.

5.3.1 Варирање коефицијента нелинеарности

Приликом ове анализе је вариран коефицијент нелинеарности у опсегу од $\alpha=2$ до $\alpha=6$, чиме се симулира промена стања одводника, док су остали параметри МОП-а као у Таб. 5.1.1. Практично се овом симулацијом врши анализа осетљивости показатеља на промену стања МОП-а. Уважавајући први принцип добрих показатеља стања, закључује се да је показатељ стања МОП-а бољи уколико је промена показатеља у оквиру ове симулације већа. За квантификацију осетљивости показатеља је усвојена апсолутна вредност првог извода релативне промене показатеља у тачки у којој коефицијент нелинеарности одговара новом одводнику ($\alpha=6$). Приликом одређивања релативних вредности показатеља, за

базне вредности су коришћене вредности показатеља при коефицијенту нелинеарности $\alpha=6$.

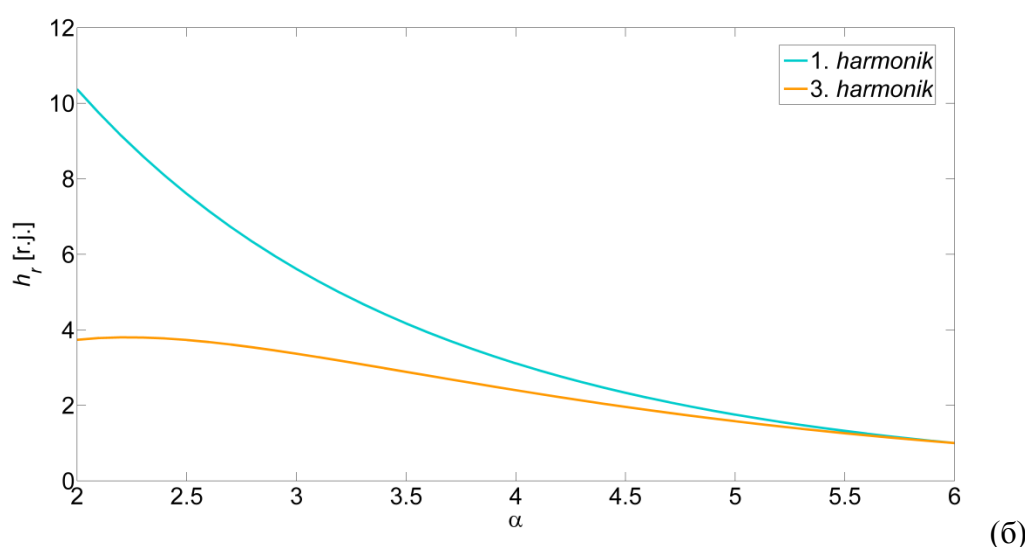
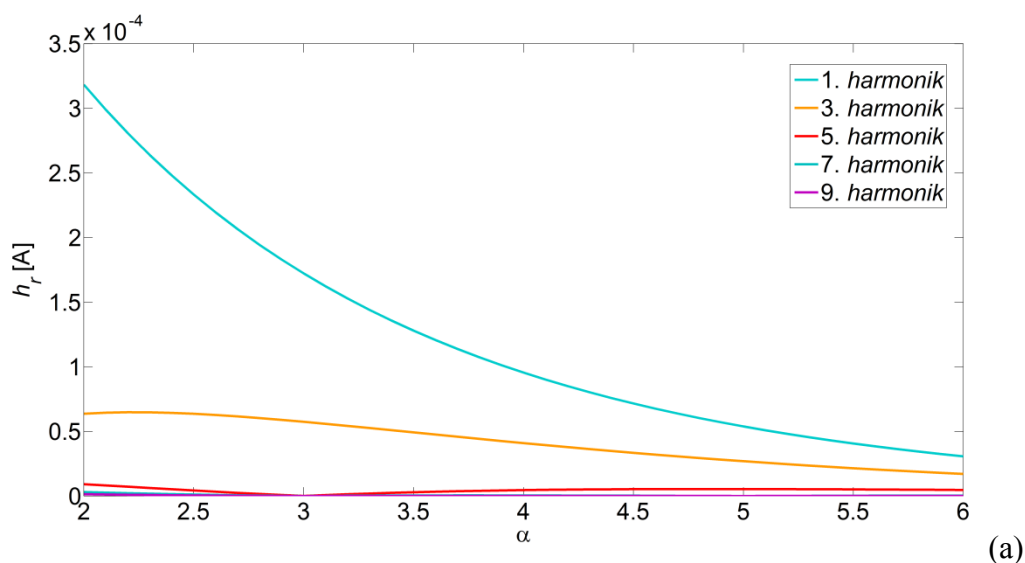
На Сл. 5.3.1(а) су приказане апсолутне промене основног и виших хармоника (закључно са 9.) укупне струје одвођења при промени коефицијента нелинеарности. Може се закључити да највеће апсолутне вредности имају основни и трећи хармоник, као и да се највеће промене дешавају управо на тим хармоницима укупне струје. Из тог разлога су ова два хармоника издвојена, а њихова релативна промена је приказана на Сл. 5.3.1(б).



Сл. 5.3.1 Утицај коефицијента нелинеарности на промену виших хармоника укупне струје одвођења: (а) апсолутне вредности и (б) релативне вредности

Са Сл. 5.3.1 се може закључити да, иако основни хармоник укупне струје одвођења има већу апсолутну вредност, релативна промена трећег хармоника са променом стања одводника је већа, па је самим тим и трећи хармоник укупне струје одвођења бољи показатељ стања.

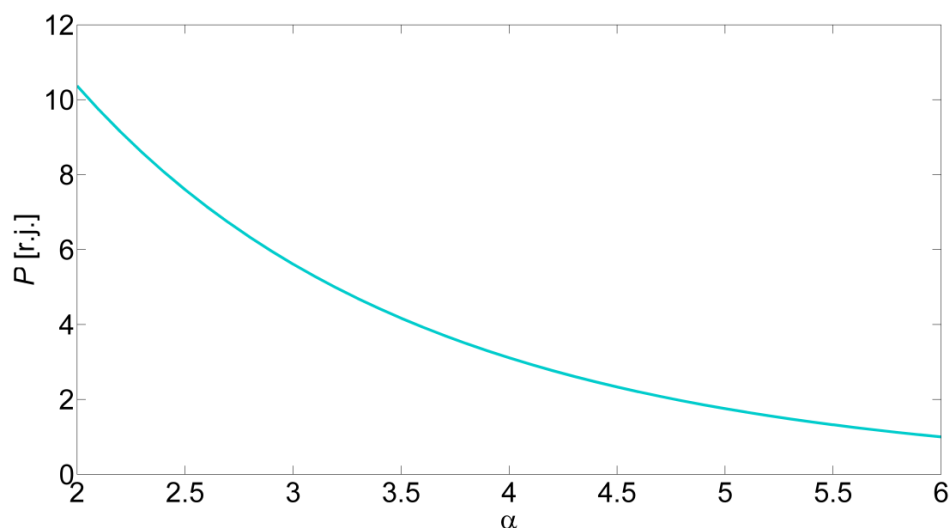
Апсолутне промене основног и виших хармоника резистивне струје одвођења при промени коефицијента нелинеарности су приказане на Сл. 5.3.2 (а), док су на Сл. 5.3.2 (б) приказане релативне промене основног и трећег хармоника резистивне струје одвођења.



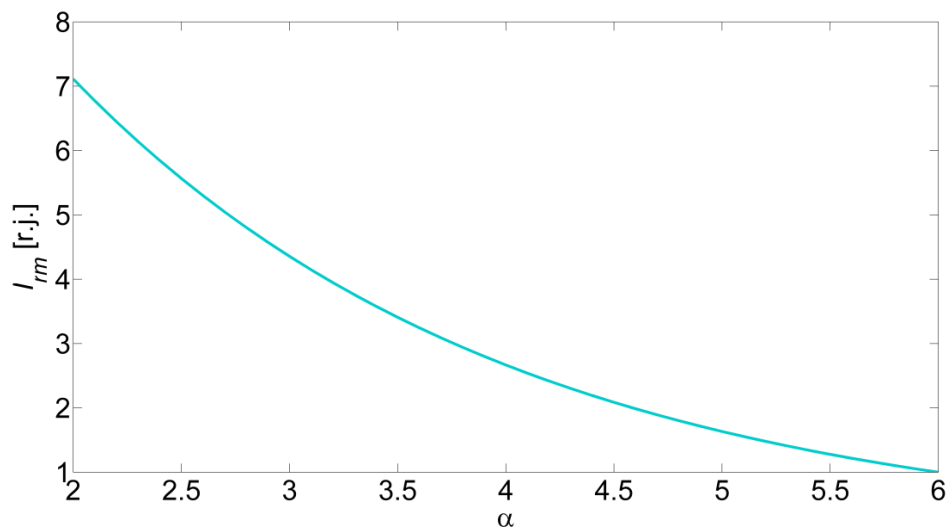
Сл. 5.3.2 Утицај коефицијента нелинеарности на промену виших хармоника резистивне струје одвођења: (а) апсолутне вредности и (б) релативне вредности

Са Сл. 5.3.2 се може закључити да је релативна промена основног хармоника са променом стања одводника већа од релативне промене трећег хармоника, па је самим тим и основни хармоник резистивне струје одвођења бољи показатељ стања.

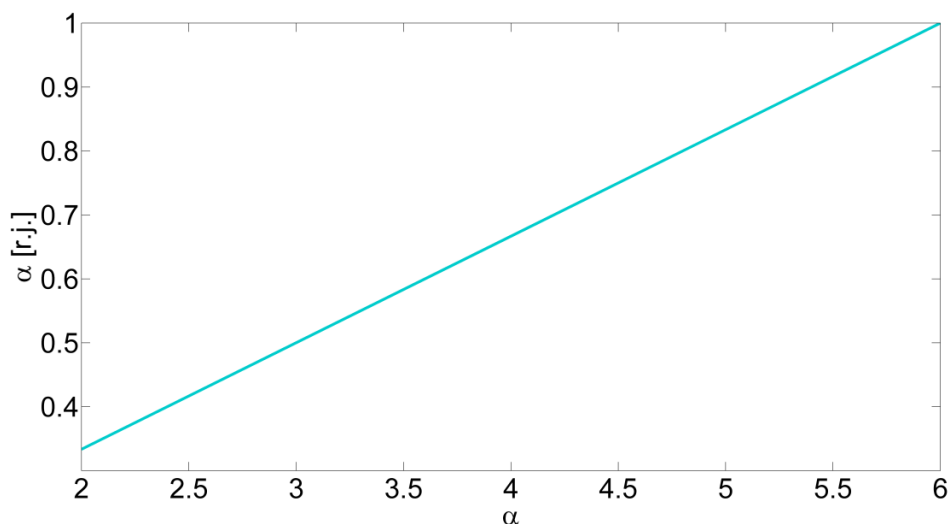
На Сл. 5.3.3 - Сл. 5.3.5 су приказане релативне промене активне снаге губитака, максималне вредности резистивне струје одвођења и коефицијента нелинеарности респективно. На основу релативних промена може се закључити да је најбољи показатељ снага губитака, затим максимална резистивна струја, док је коефицијент нелинеарности најгори показатељ са становишта релативне промене са променом стања МОП-а. Међутим, позитивне особине које има коефицијент нелинеарности као показатељ стања преовлађују у односу на овај недостатак, што је показано у наредним поглављима.



Сл. 5.3.3 Релативна промена активне снаге губитака МОП-а при промени коефицијента нелинеарности



Сл. 5.3.4 Релативна промена максималне вредности резистивне струје при промени коефицијента нелинеарности



Сл. 5.3.5 Релативна промена коефицијента нелинеарности при промени стања МОП-а

5.3.2 Флуктуација напона напајања

У оквиру ове анализе вршено је варирање напона напајања у опсегу од $u=0,9$ r.j. до $u=1,1$ r.j., где је за базну вредност усвојен називни напон мреже дефинисан у Таб. 5.1.1, док су остали параметри МОП-а исти као у Таб. 5.1.1. Циљ анализе јесте да се покаже колика је варијација појединих показатеља стања МОП-а са променом напона напајања. Према другом принципу показатеља стања МОП-а, у оквиру ове анализе би требало да су варијације показатеља што је могуће мање. Такође је потребно проверити да ли се могу извести погрешни закључци у случају да показатељи новог и деградираног МОП-а имају исте

вредности при различитим напонима напајања. Због овога су све анализе вршене за нов и деградиран одводник пренапона. Претпостављајући линеарну зависност коефицијента нелинеарности од напона напајања као и у анализи тачности метода, у опсегу промене напона усвојени су опсежи коефицијената нелинеарности новог и деградираног одводника $\alpha_{\text{nov}}=4\div 5$ и $\alpha_{\text{deg}}=3\div 4$.

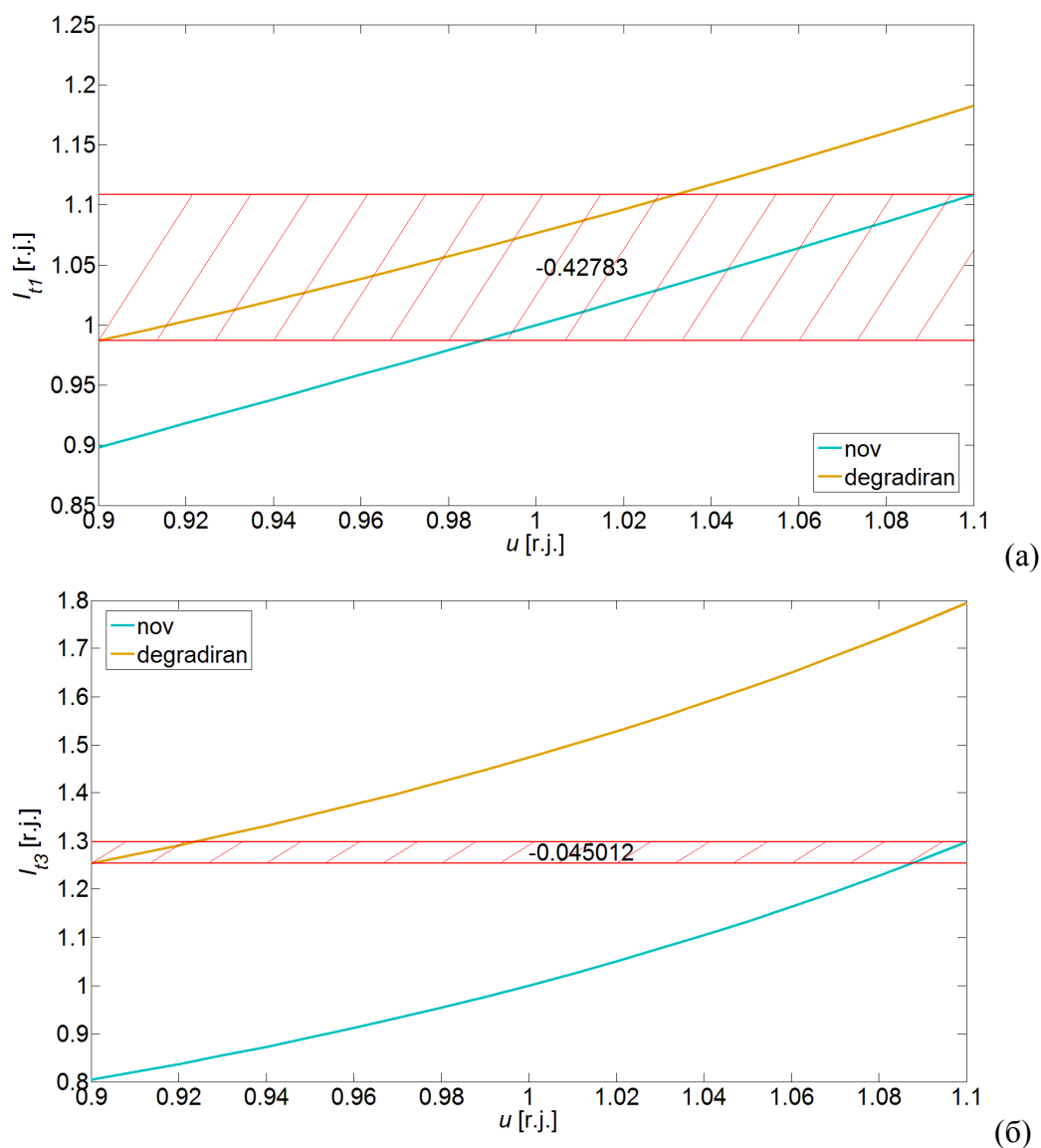
Да би се претходни аспект квантификовао, уведен је и појам маргине показатеља стања МОП-а, која теоријски може имати вредности између -1 и 1. Маргина се одређује као релативна вредност у односу на укупан опсег промене показатеља у случају новог и деградираног МОП-а, а показује колики је опсег преостао до поклапања показатеља у случају позитивне маргине, односно у ком опсегу се показатељи преклапају у случају негативне маргине. Са аспекта колебања напона, већа вредност маргине подразумева бољи показатељ стања МОП-а.

Приликом одређивања релативних вредности показатеља стања МОП-а, као базне вредности су коришћене вредности показатеља новог МОП-а при напону напајања од 1 г.ј.

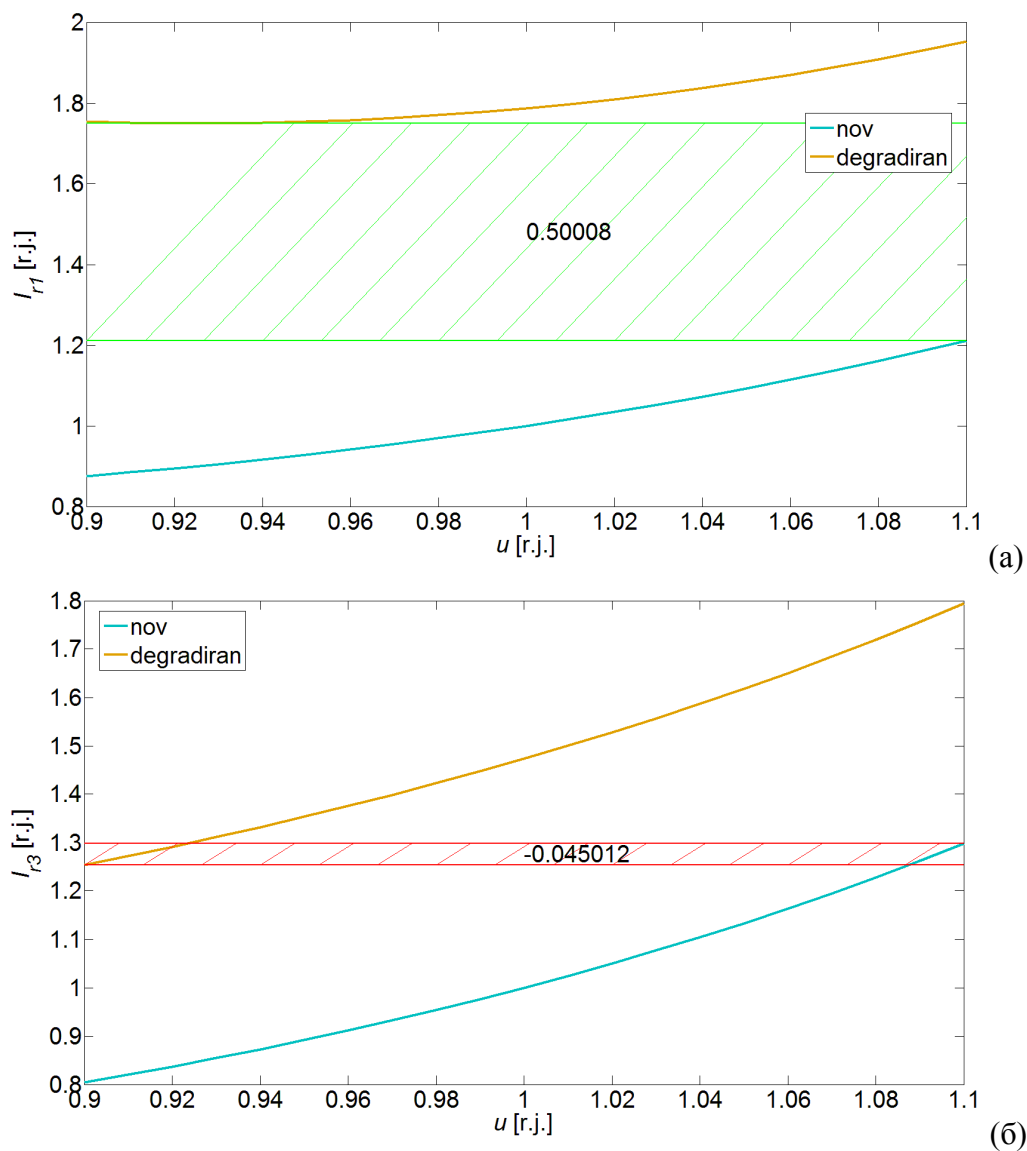
На Сл. 5.3.6 је приказана промена основног и трећег хармоника укупне струје одвођења за нов и деградиран одводник приликом колебања напона са одговарајућим маргинама. Са Сл. 5.3.6 се може закључити да је варијација основног хармоника већа и са тог аспекта је трећи хармоник бољи показатељ стања. Међутим, може се такође закључити да постоји негативна маргина која може довести до доношења погрешних закључака у процесу дијагностике стања МОП-а и у овом случају је потребно потенцијално увођење корекционих фактора по амплитуди напона напајања.

На Сл. 5.3.7 су приказане релативне промене основног и трећег хармоника резистивне струје при колебању напона за нов и деградиран одводник са одговарајућим маргинама. Лако се може закључити да је основни хармоник резистивне струје бољи показатељ стања МОП-а јер има позитивну маргину, док је трећи хармоник резистивне са истом негативном мааргином као и трећи хармоник укупне струје. Овај закључак је логичан уважавајући чињеницу да у напону напајања нема виших хармоника па је трећи хармоник укупне струје искључиво последица трећег хармоника резистивне компоненте.

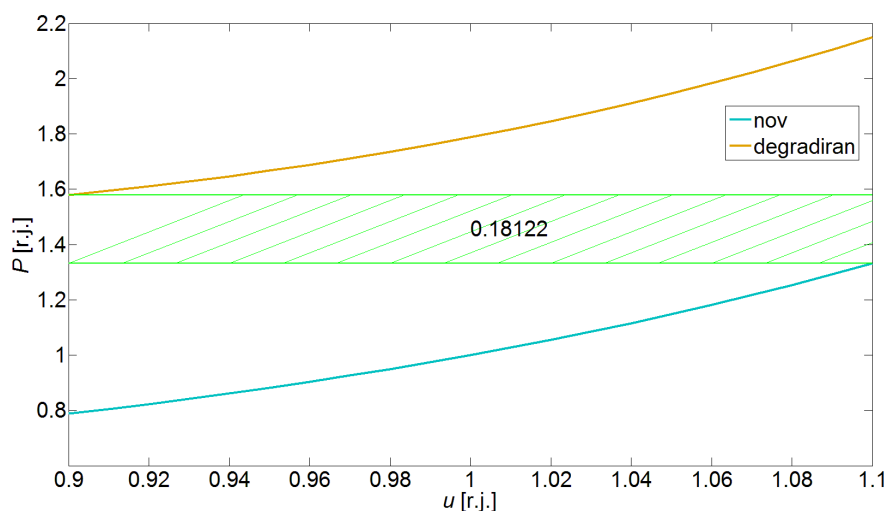
На Сл. 5.3.8 - Сл. 5.3.10 су приказане релативне промене активне снаге губитака, максималне резистивне струје и коефицијента нелинеарности при колебању напона са одговарајућим маргинама. Са ових слика се може уочити сличан тренд раста показатеља као и у случају хармоника резистивне и укупне струје, осим за коефицијент нелинеарности МОП-а. Маргина коефицијента нелинеарности, која је једнака 0, је дефинисана опсегом линеарне промене коефицијента нелинеарности са променом напона за нов и деградиран МОП. За друге опсеге ова маргина може добити како позитивне тако и негативне вредности, али би промена опсега коефицијента нелинеарности изазвала промене маргина и осталих показатеља стања МОП-а.



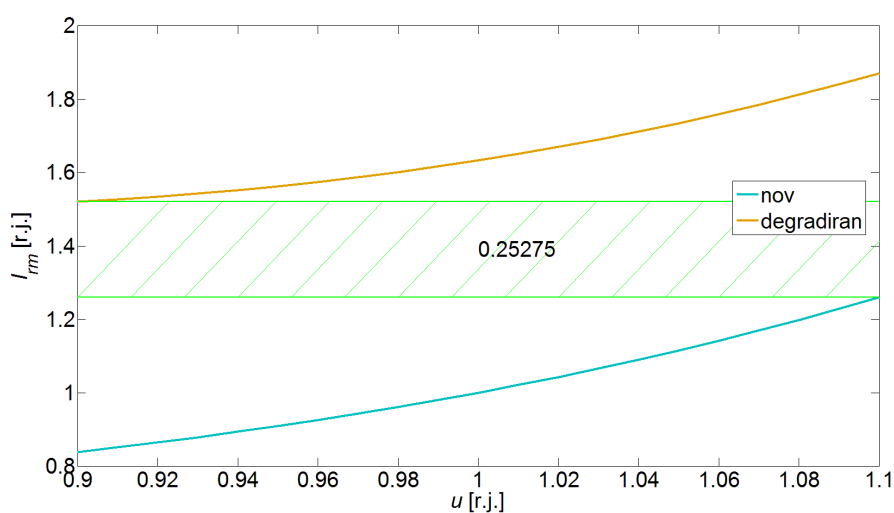
Сл. 5.3.6 Релативна промена основног (а) и трећег (б) хармоника укупне струје при колебању напона, за нов и деградиран одводник



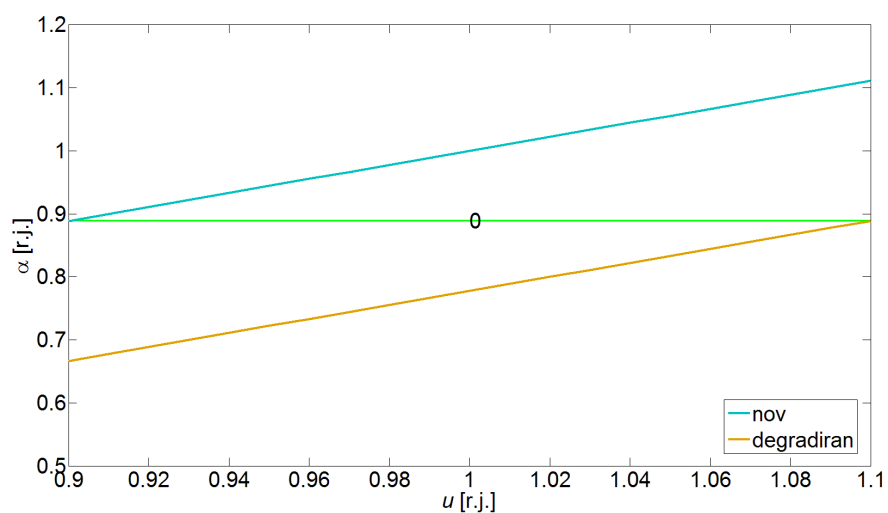
Сл. 5.3.7 Релативна промена основног (а) и трећег (б) хармоника резистивне струје при колебању напона, за нов и деградиран одводник



Сл. 5.3.8 Релативна промена активне снаге губитака при колебању напона



Сл. 5.3.9 Релативна промена максималне вредности резистивне струје при колебању напона



Сл. 5.3.10 Релативна промена коефицијента нелинеарности при колебању напона

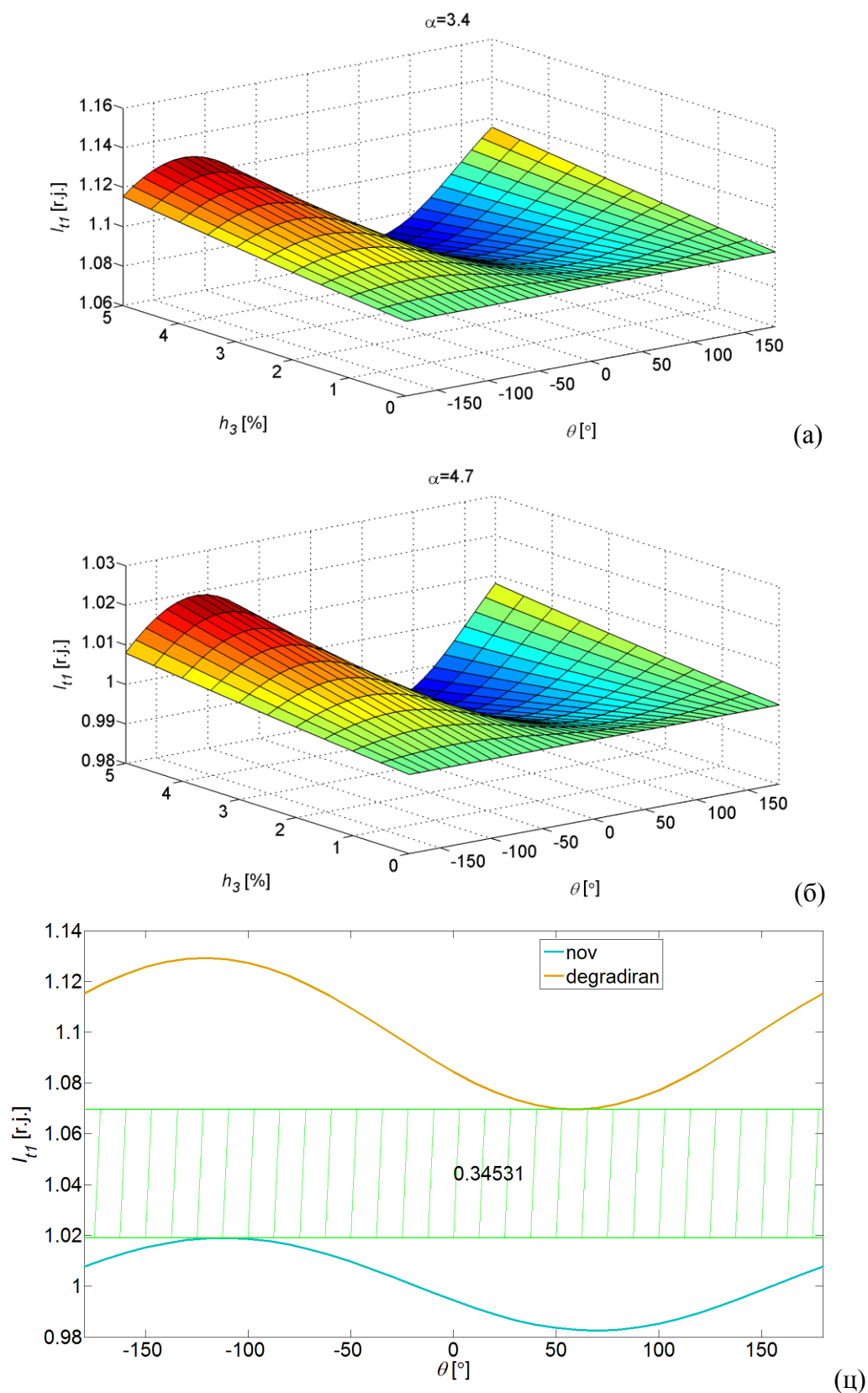
5.3.3 Варирање садржаја хармоника у напону напајања

У случају постојања виших хармоника у напону напајања, може се очекивати да сви електрични показатељи стања (активна снага, хармоници струје одвођења и амплитуда резистивне струје) претрпе веће или мање промене у зависности од реда хармоника, његове амплитуде и фазног става. С обзиром да директно зависи само од стања МОП-а, може се очекивати да садржај хармоника напона нема утицај на промену коефицијента нелинеарности.

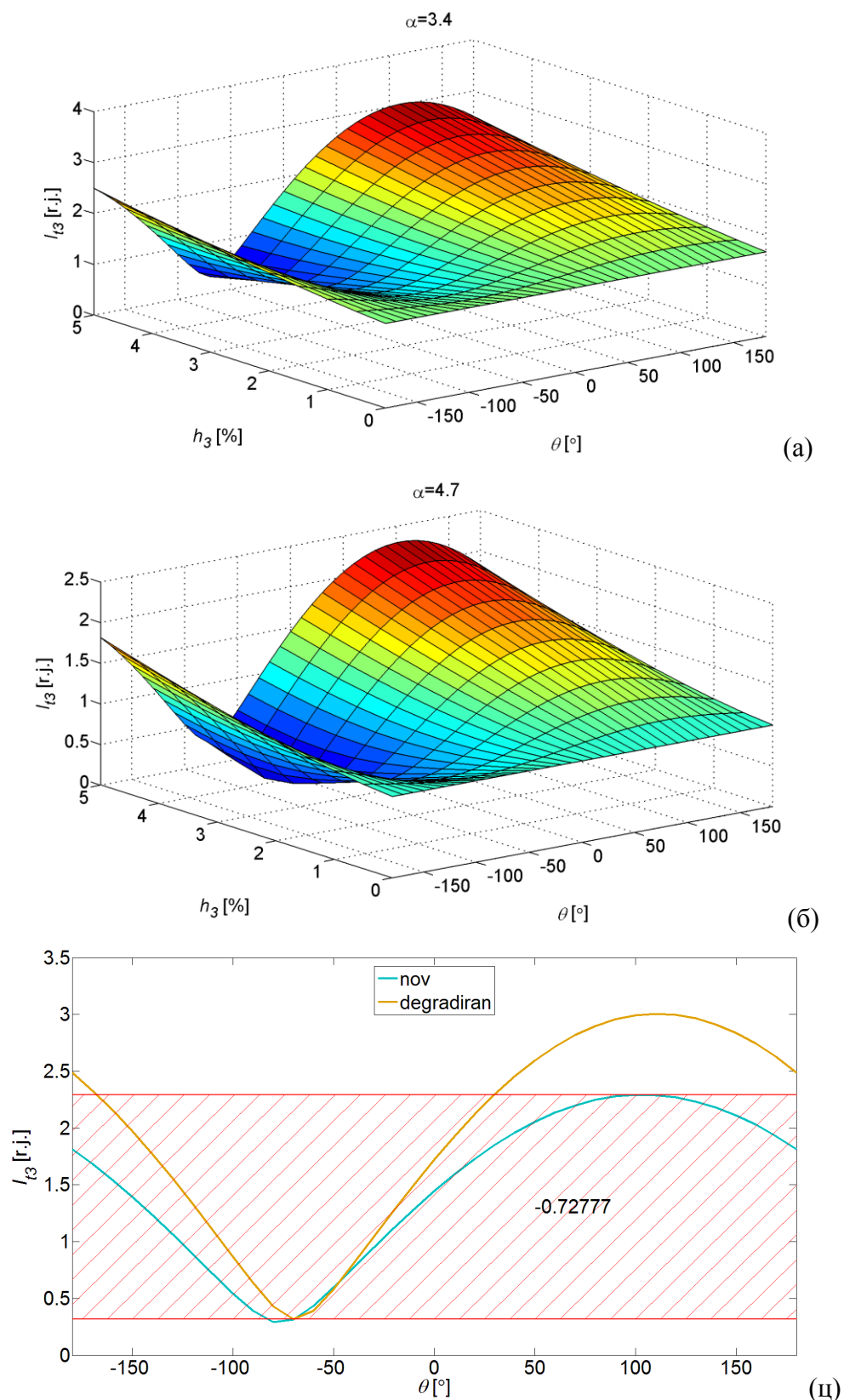
У оквиру ове анализе вршена је промена 3., 5. и 7. хармоника напона у опсегу од 0% до 5%, и њихових фазних ставова у опсегу од -180° до 180° . Приликом одређивања релативних вредности показатеља, као базне вредности су коришћени показатељи новог МОП-а без присуства хармоника. Као и у случају колебања напона, коришћена је маргина показатеља стања као квантификатор погодности показатеља приликом варијације виших хармоника напона.

На Сл. 5.3.11 - Сл. 5.3.17 су приказани резултати симулација у случају варирања амплитуде и фазног става 3. хармоника напона. За сваки показатељ стања су приказани 3D дијаграми новог и деградираног МОП-а, као и 2D дијаграм који представља најкритичнији случај са аспекта доношења одлука о стању МОП-а са одговарајућом маргином. Најкритичнијим случајем се сматра онај у коме се јавља минимална вредност показатеља деградираног МОП-а и максимална вредност показатеља новог МОП-а. Потребно је напоменути да се ти случајеви не морају јавити у истим условима са аспекта хармоника, што је прихватљиво јер се ни у погону немају исти услови сваки пут приликом мерења потребних за мониторинг МОП-а.

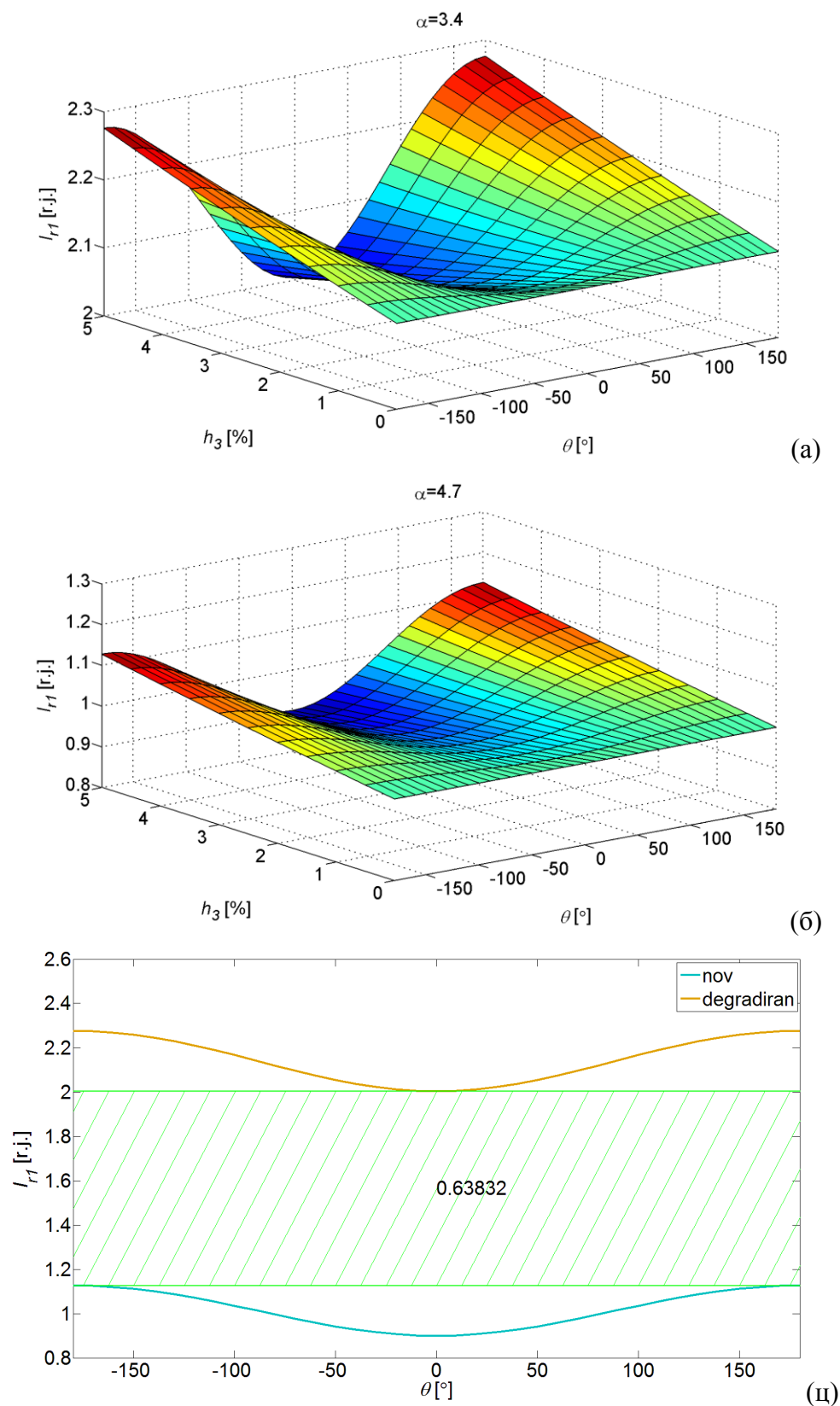
Појава 5. и 7. хармоника у напону напајања имају сличан ефекат, али је он много мање изражен. Утицај ових хармоника на показатеље стања МОП-а је приказан на дијаграмима у Прилог 4 –Утицај 5. и 7. хармоника напона на показатеље стања МОП-а.



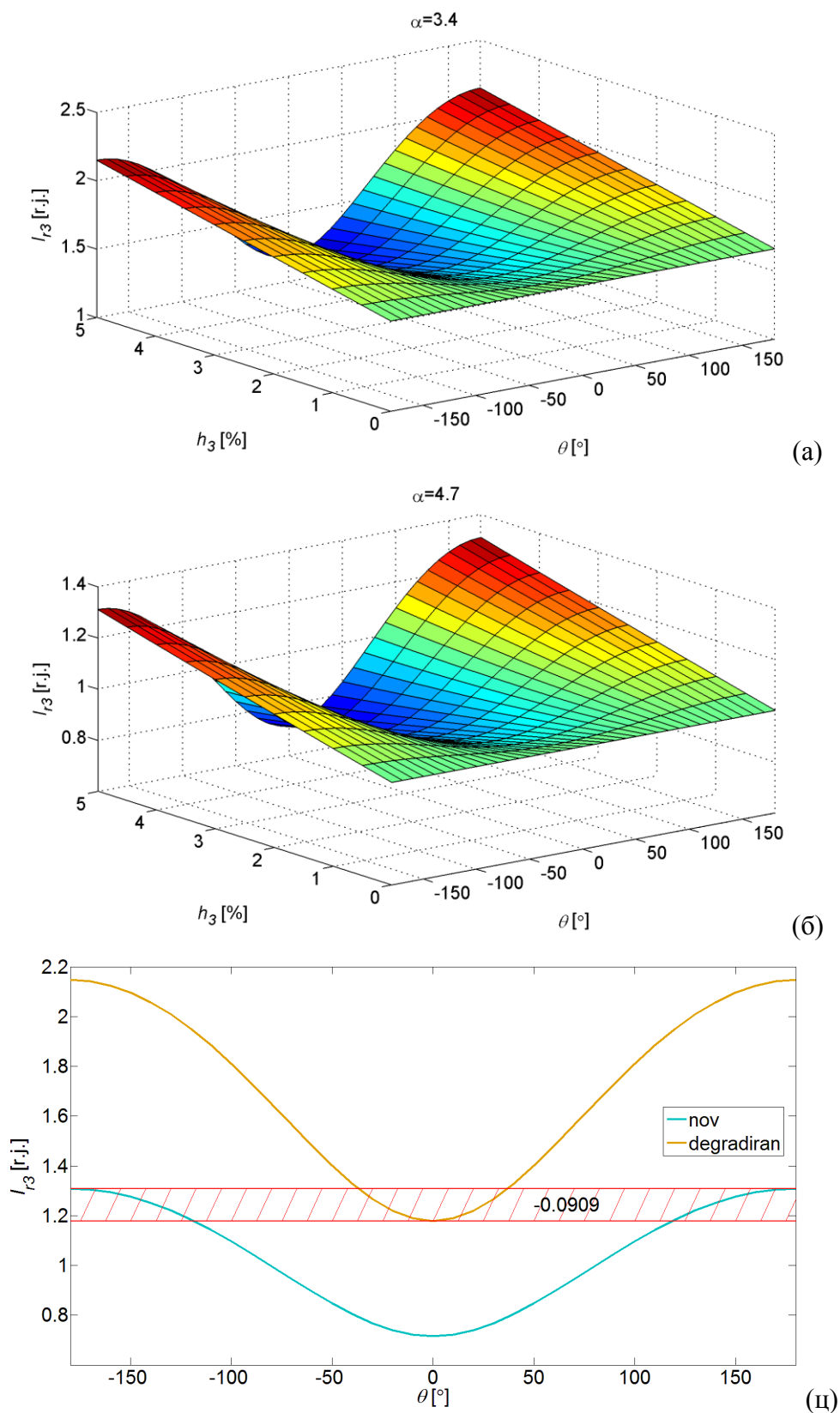
Сл. 5.3.11 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)



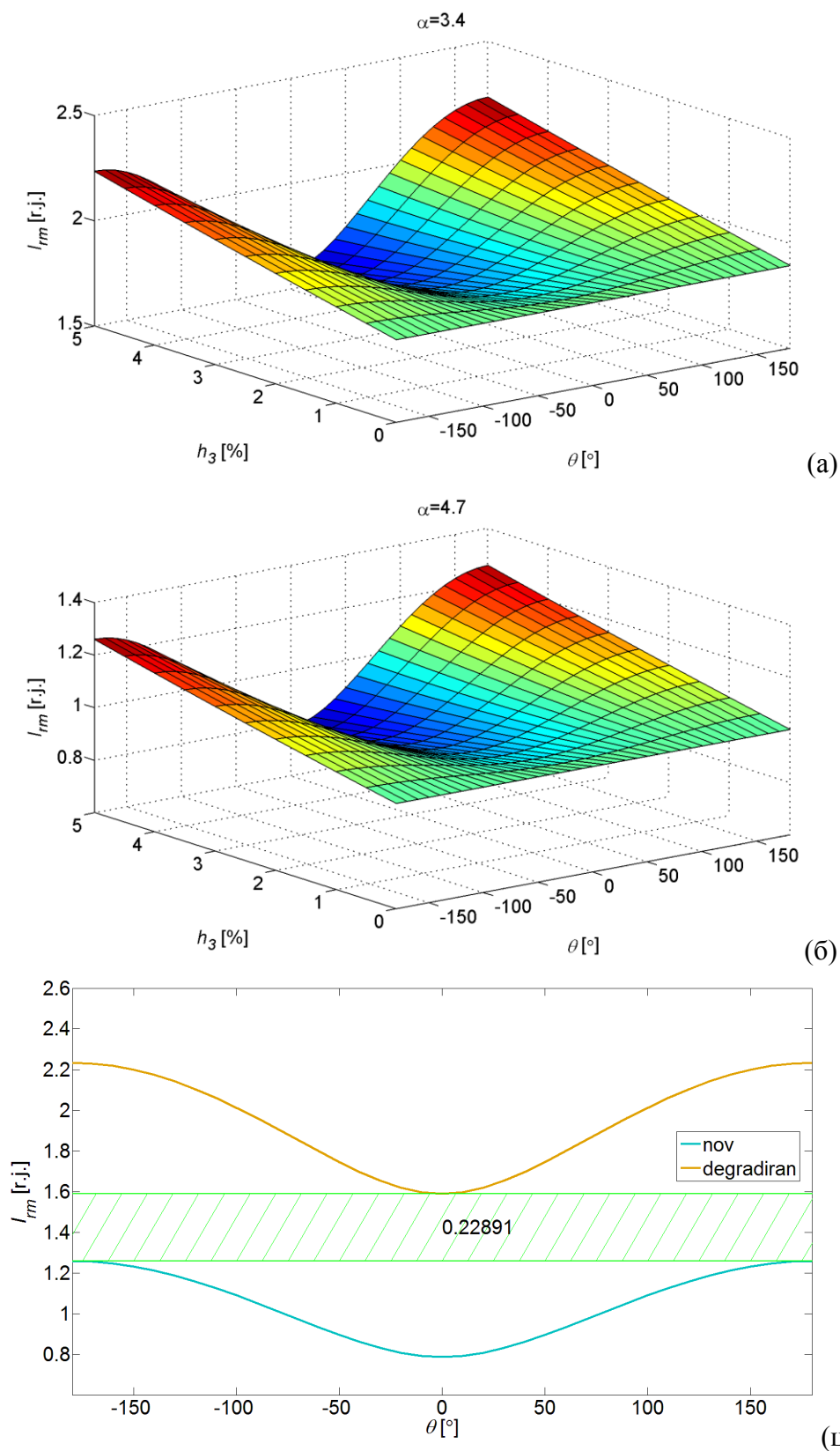
Сл. 5.3.12 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



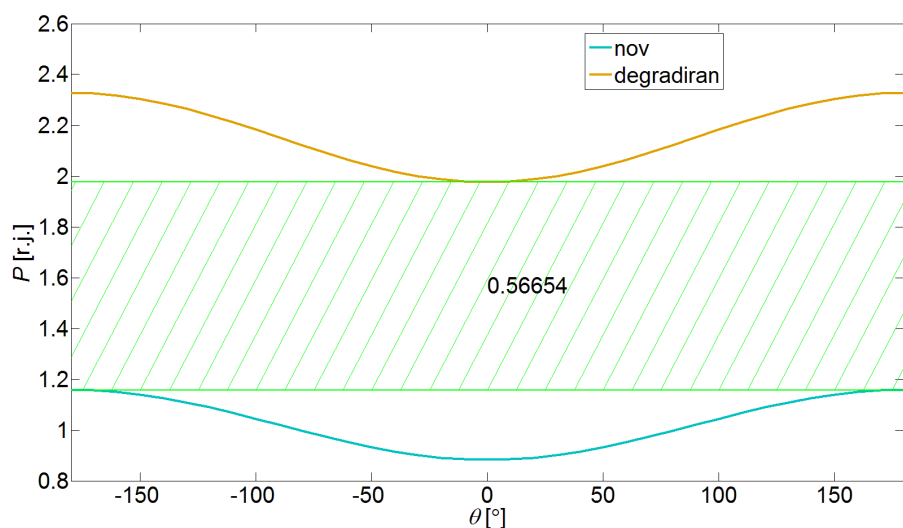
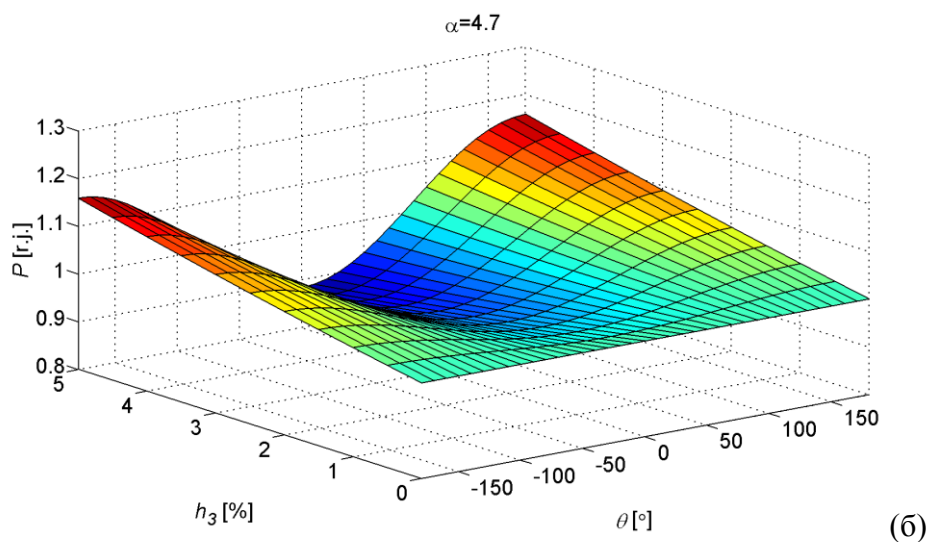
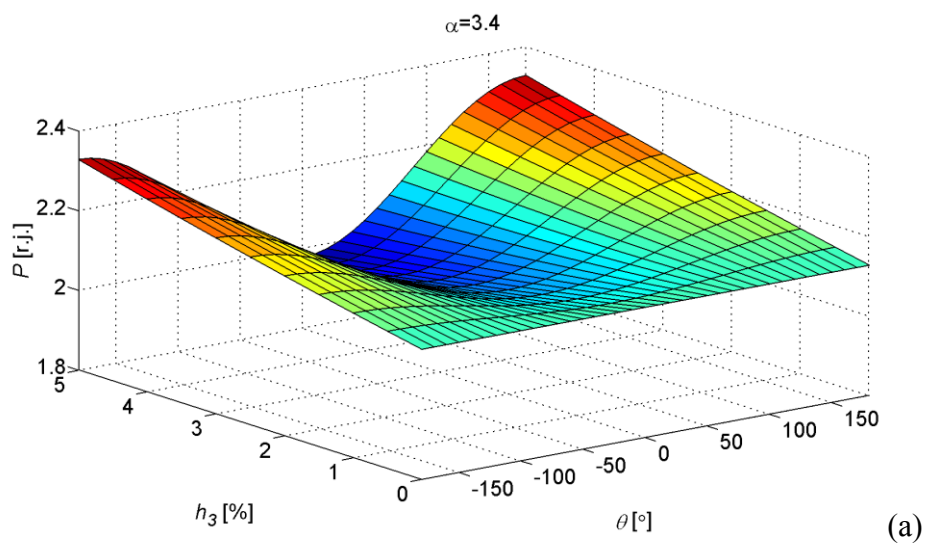
Сл. 5.3.13 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



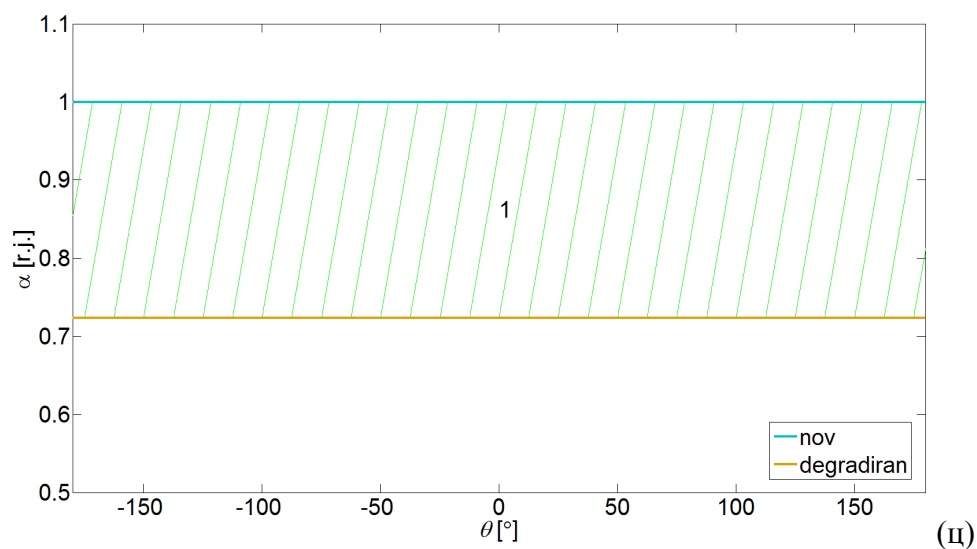
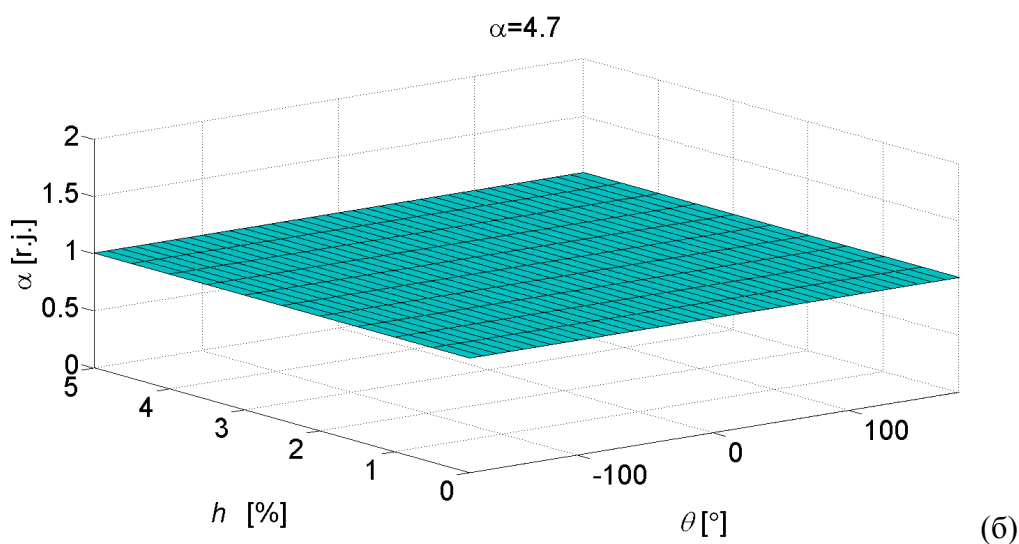
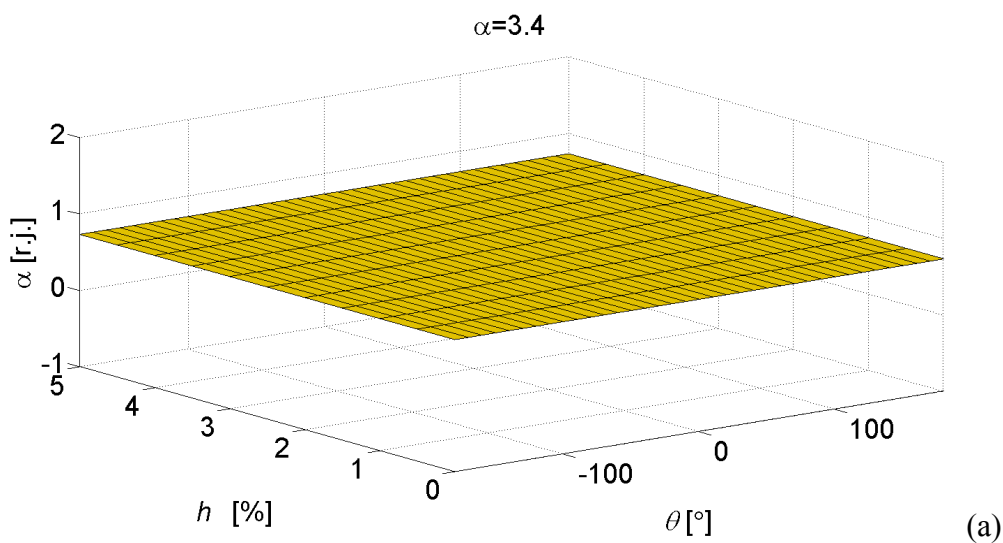
Сл. 5.3.14 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. 5.3.15 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. 5.3.16 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. 5.3.17 Утицај амплитуде и фазног става 3. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)

5.3.4 Дискусија резултата симулација

У симулацијама описаним у оквиру овог поглавља је извршена анализа осетљивости показатеља стања на промену стања МОП-а и на услове напајања са аспекта колебања напона и промене амплитуда и фазних ставова виших хармоника напона напајања. Након спроведених анализа могу се извести следећи закључци:

- Са аспекта осетљивости на промену стања МОП-а, најбољи показатељи су основни хармоник резистивне струје и активна снага губитака. На другом месту је максимална вредност резистивне струје, а затим следе коефицијент нелинеарности и трећи хармоници укупне и резистивне струје, док је на последњем месту основни хармоник укупне струје.
- Са аспекта колебања напона, анализом маргина означених на Сл. 5.3.6 - Сл. 5.3.10, лако се закључује да је најбољи показатељ стања коефицијент нелинеарности са максималном вредношћу маргине. Сви остали показатељи имају негативну маргину у опсегу напона од 0,9 до 1,1 г.ј. Међу осталим показатељима најбољи је основни хармоник резистивне струје са маргином од -0,034, затим следе активна снага губитака и максимална вредност резистивне струје са сличним маргинама око -0,13. На предпоследњем месту су трећи хармоници укупне и резистивне струје са маргинама -0,24, док је најгори показатељ основни хармоник укупне струје који показује преклапања у чак 47,5% свог опсега.
- Са аспекта утицаја виших хармоника напона напајања, анализирајући дијаграме на Сл. 5.3.11 - Сл. 5.3.17, закључује се да негативну маргину имају основни хармоници укупне и резистивне струје одвођења. Као најбољи показатељ поново се истиче коефицијент нелинеарности са максималном вредношћу маргине показатеља. Са нешто мањим вредностима маргине су основни хармоник резистивне струје и активна снага губитака, док релативно мале вредности маргине имају основни хармоник укупне струје и максимална вредност резистивне струје.

Осетљивост показатеља на промену стања МОП-а и вредности маргина у случају колебања напона и виших хармоника су приказане у Таб. 5.3.1.

Таб. 5.3.1 Осетљивост и маргине показатеља стања МОП-а

Показатељ	Осетљивост на стање МОП-а	Маргине колебања напона	Маргине 3. хармоника напона
I_{t1}	0,014	-0,428	0,345
I_{t3}	0,578	-0,045	-0,728
I_{r1}	0,754	0,500	0,638
I_{r3}	0,578	-0,045	-0,091
I_{rm}	0,633	0,253	0,229
P	0,754	0,181	0,566
α	0,167	0	1,000

Напомена: **црвена** - најгори показатељ, **црна** – најбољи показатељ

С обзиром да сви електрични показатељи стања МОП-а (сви показатељи сем коефицијента нелинеарности) показују веће или мање девијације са променом услова напајања, у случају коришћења ових показатеља стања било би потребно на основу детаљније анализе формирати корекционе факторе којима би се сви показатељи прерачунавали на базну вредност. Једино се у случају увођења корекционих фактора може имати користи од електричних показатеља стања МОП-а. Формирање оваквих корекционих фактора није једноставан задатак, поготово имајући у виду да се у реалним условима експлоатације истовремено појављују сви ефекти промене услова напајања.

Једно од могућих решења овог проблема се може наћи у примени коефицијента нелинеарности за одређивање свих осталих показатеља стања МОП-а. Наиме, након одређене вредности коефицијента нелинеарности, који је независан од услова напајања, применом рачунарских симулација и еквивалентне шеме МОП-а се могу једноставно одредити електрични показатељи стања МОП-а у чисто синусоидалним условима при трајном радном напону. На овај начин се практично елиминише потреба за увођењем корекционих фактора, а одређују се показатељи који имају већу осетљивост на стање МОП-а од самог коефицијента нелинеарности.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА МЕТОДА ЗА МОНИТОРИНГ МОП-А

6.1. Уводна разматрања

У циљу експерименталне верификације алгоритама за мониторинг МОП-а извршен је низ експеримената у Лабораторији за високи напон на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Експерименти су вршени на средњенапонским одводницима пренапона типа MWK чији је произвођач АБВ. Тачније, тестирани одводници су типа MWK 7, трајног радног напона $U_c=7\text{ kV}$. Карактеристичне величине одводника су приказане у Таб. 6.1.1.

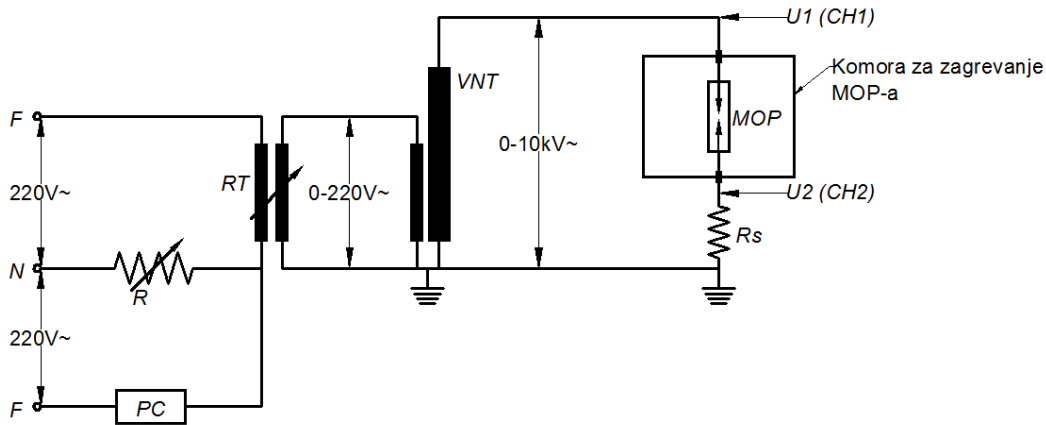
Таб. 6.1.1 Основни подаци о одводнику MWK 7, произвођача АБВ

U_c [kVrms]	U_r [kVrms]	I_{ref} [mA _p]	U_{ref} [kVrms]	I_n [10kA]	U_{pl} [kV _p]
7	8,8	2,2	9,5	10	21,5

У оквиру експеримената извршене су три различите групе мерења:

1. Мерења на одводнику приликом три различите вредности напона напајања приближно једнаким 90%, 100% и 110% вредности трајног радног напона;
2. Мерења на одводнику при ефективној вредности напона напајања приближно једнакој трајном радном напону у три различита случаја са аспекта садржаја виших хармоника у напону напајања,
3. Мерења на одводнику при ефективној вредности напона напајања приближно једнакој трајном радном напону на различитим амбијенталним температурама у опсегу од 25°C ÷ 100°C.

Приликом свих мерења коришћена је иста експериментална поставка, приказана на Сл. 6.1.1. На Сл. 6.1.1 су: RT – регулациони трансформатор, VNT – високонапонски трансформатор преносног односа 220 V/10 kV, R – отпорник променљиве вредности отпорности у опсегу 0 Ω ÷ 33 Ω, PC – персонални рачунар, MOP – тестирани одводник пренапона, R_s – шант отпорник отпорности 1000 Ω. На Сл. 6.1.1 је такође приказана комора за загревање одводника пренапона која омогућава загревање без прекида напајања одводника.



Сл. 6.1.1 Експериментална поставка

Улога персоналног рачунара и променљивог отпорника на Сл. 6.1.1 јесте промена садржаја виших хармоника у напону напајања. Персонални рачунар и регулациони трансформатор су повезани на исту фазу, са тим што је неутралним проводником повезан отпорник променљиве отпорности. С обзиром да је рачунар нелинеарни потрошач, укључењем рачунара кроз неутрални проводник протиче струја јачине око 1 А која у себи садржи више хармонике. Као последица ове струје, на отпорнику R се јавља напон који садржи исте више хармонике као и струја рачунара. Променом отпорности отпорника у опсегу $0 \Omega \div 33 \Omega$ се практично мења пад напона између нултог и фазног проводника регулационог трансформатора у опсегу $0 \text{ V} \div 33 \text{ V}$, а самим тим се мења и садржај хармоника у напону напајања регулационог трансформатора. Сви хармоници се преносе и преко регулационог и преко високонапонског трансформатора.

Током свих експеримената вршена су мерења напона напајања и укупне струје одвођења МОП-а, мерењем напона у две тачке приказане на Сл. 6.1.1. Мерења напона високонапонског трансформатора су вршена коришћењем напонске сонде *Tektronix*, преносног односа 1/1000. Мерење напона на шант отпорнику је вршено директно помоћу коаксијалног кабла. Сигнали мерених вредности напона су вођени на канале двоканалног осцилоскопа *Tektronix TDS2000*. Коришћењем измерених вредности, могу се одредити напон напајања (u) и укупна струја одвођења (i_t):

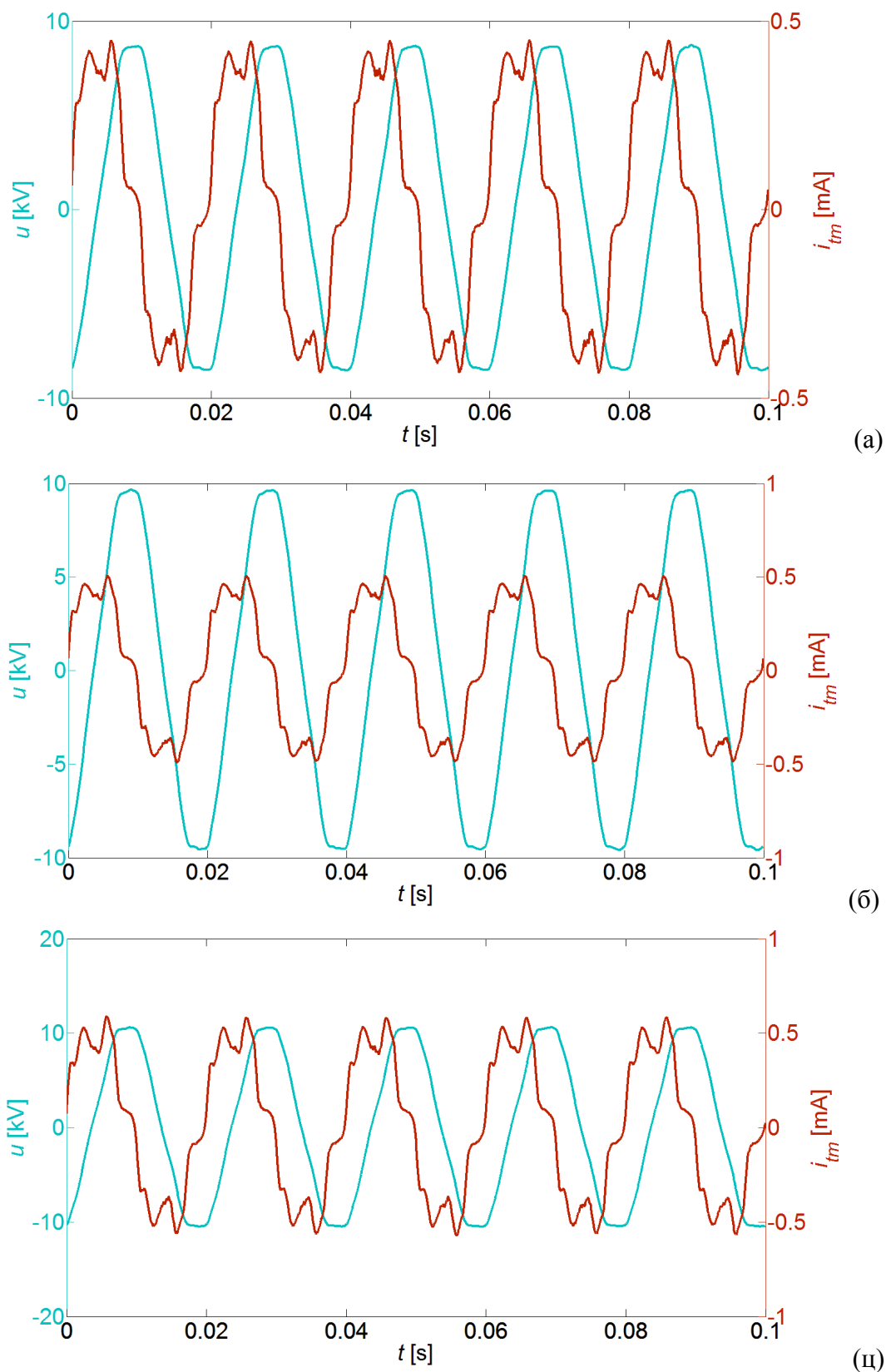
$$u = U_1 - U_2 \quad (6.1.1)$$

$$i_t = \frac{U_2}{R_s} \quad (6.1.2)$$

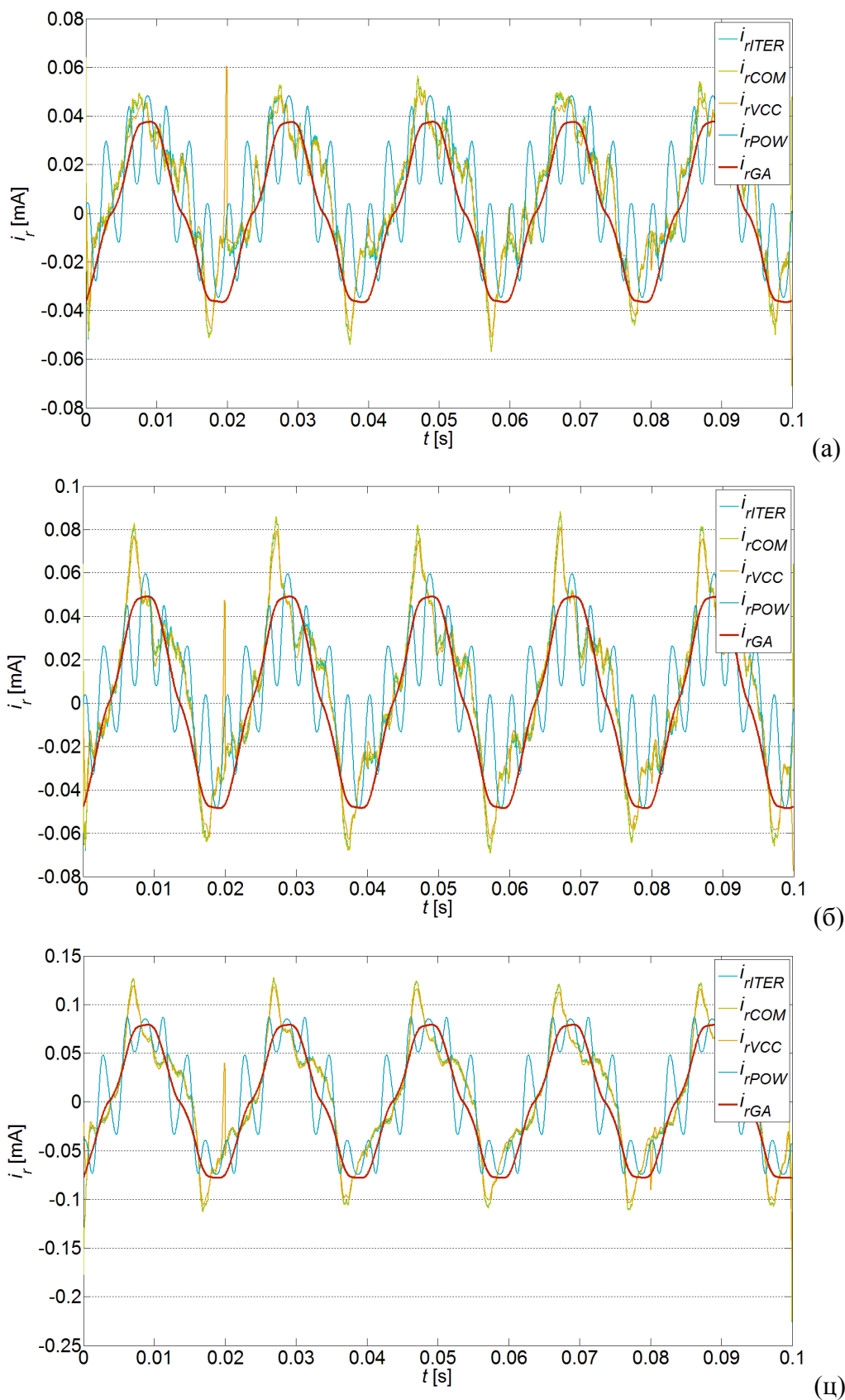
6.2. Мерења приликом флукуације напона напајања

У оквиру анализа приликом флукуације напона напајања извршена су мерења напона и струје одвођења при ефективним вредностима напона напајања приближно једнаким $0,9U_c$, U_c и $1,1U_c$. Сва мерења су вршена на амбијенталној температури од $T_a=25^\circ\text{C}$. Таласни облици напона (u) и укупне струје одвођења (i_m) прорачунати применом једначина (6.1.1) и (6.1.2) су приказани на Сл. 6.2.1.

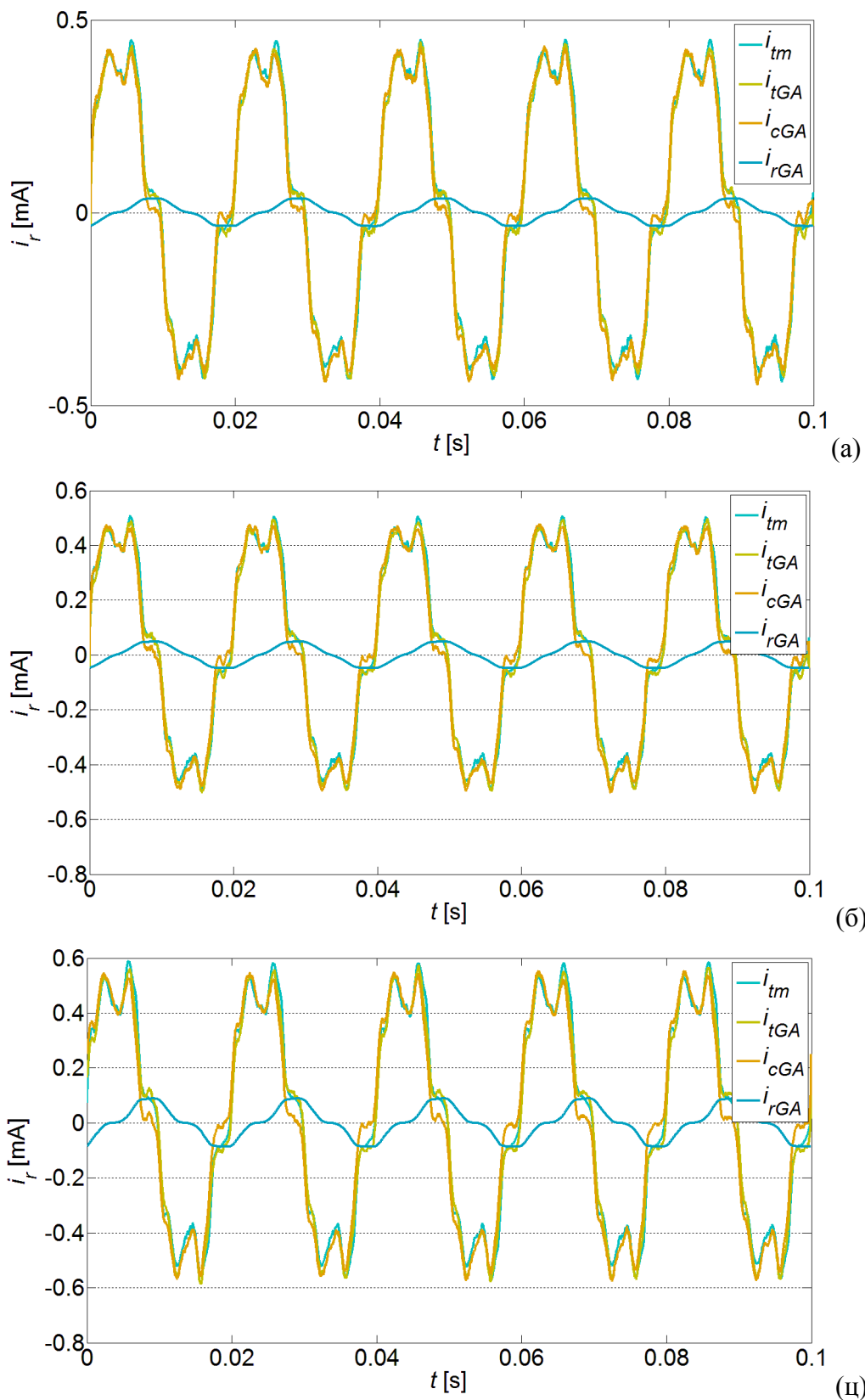
Користећи измерене, тј. прорачунате према једначинама (6.1.1) и (6.1.2), таласне облике напона и укупне струје одвођења, примењене су методе за мониторинг и дијагностику МОП-а и на основу њих одређени су показатељи стања МОП-а. Тако су коришћене *HARM*, *P*, *DIR*, *VCC*, *COM*, *POW*, *ITER* и *GA* методе. Применом *VCC*, *COM*, *POW*, *ITER* и *GA* метода су одређени таласни облици резистивне струје одвођења. Таласни облици резистивних струја за ових пет метода су приказани на Сл. 6.2.2. Са Сл. 6.2.2 се може уочити да *POW* метода даје најгоре резултате, као последица постојања виших хармоника у напону напајања. Такође се може уочити да се резистивне струје одређене *VCC*, *COM* и *ITER* методама практично веома добро поклапају док резистивна струја одређена *GA* методом има нешто другачији облик. Разлог овоме је чињеница да *VCC*, *COM* и *ITER* методе одређују резистивну компоненту одређивањем капацитивности МОП-а, а затим одузимањем капацитивне струје од укупне струје одвођења. На овај начин се добија резистивна компонента која у себи садржи шум и друге сметње приликом мерења и за коју не важе једначине модела МОП-а. Показатељ овога представљају промене вршних вредности резистивне струје по периодима. За разлику од ових метода, *GA* метода поред одређивања капацитивности МОП-а одређује и коефицијенте волт-амперске карактеристике k и α , а резистивну струју одређује помоћу овако дефинисане зависности од напона. Тиме се добија и укупна струја МОП-а која мало одступа од измерене струје одвођења, а управо је ово одступање минимизирано у процесу генетског алгорита. Измерене струје одвођења, као и укупна, капацитивна и резистивна струја одређене *GA* методом за све три вредности напона напајања су приказане на Сл. 6.2.3. Волт-амперске карактеристике одређене применом *GA* методе у сва три случаја напајања МОП-а су приказане на Сл. 6.2.4. Са Сл. 6.2.4 се може уочити зависност волт-амперске карактеристике од ефективне вредности напона напајања.



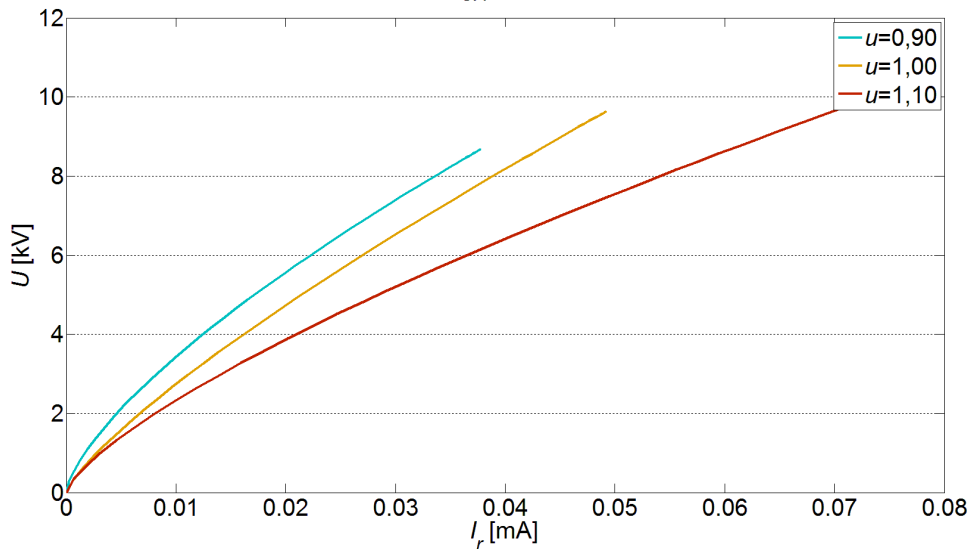
Сл. 6.2.1 Измерени сигнали напона напајања и струје одвођења на $T_a=25^\circ\text{C}$ за
 (а) $U=0,9U_c$, (б) $U=U_c$, (ц) $U=1,1U_c$



Сл. 6.2.2 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на $T_a=25^\circ\text{C}$ за
 (а) $U=0,9U_c$, (б) $U=U_c$, (ц) $U=1,1U_c$



Сл. 6.2.3 Таласни облици измерене укупне струје на 25°C и укупне, капацитивне и резистивне струје одређене применом GA методе
 (а) $U=0,9U_c$ (б) $U=U_c$ (ц) $U=1,1U_c$



Сл. 6.2.4 Волт-амперске карактеристике одводника за различите ефективне вредности напона напајања

Вредности показатеља стања МОП-а и капацитивности МОП-а, одређених применом анализираних метода су приказани у Таб. 6.2.1. Као што је и очекивано, вредности основног и трећег хармоника резистивне струје, максимална вредност резистивне струје и активна снага губитака се повећавају са повећањем напона напајања. Капацитивност МОП-а одређена *ITER*, *COM* и *GA* методама има практично исту вредност у свим случајевима. Имајући у виду да се основни хармоник резистивне компоненте струје показао као најбољи електрични показатељ стања МОП-а (поглавље 5.3.4), овај показатељ је одређен и на основу таласних облика резистивних струја *POW*, *VCC*, *COM*, *ITER* и *GA* метода. Може се закључити да су овим методама одређене исте вредности основног хармоника резистивне струје. Мала одступања од ових вредности се јављају код примене *HARM* методе, док су одступања *POW* методе већа.

Што се тиче коефицијената k и α , могу се уочити мале варијације са променом напона напајања. Мала вредност α показује да је зависност између напона и резистивне струје скоро линеарна у овом делу волт-амперске карактеристике.

У Таб. 6.2.1 је такође приказана процентуална стандардна девијација показатеља у односу на вредност показатеља при напону напајања једнаком U_c . Према критеријуму квалитета показатеља који је раније дефинисан, показатељ је утолико бољи уколико је његова варијација са напоном мања.

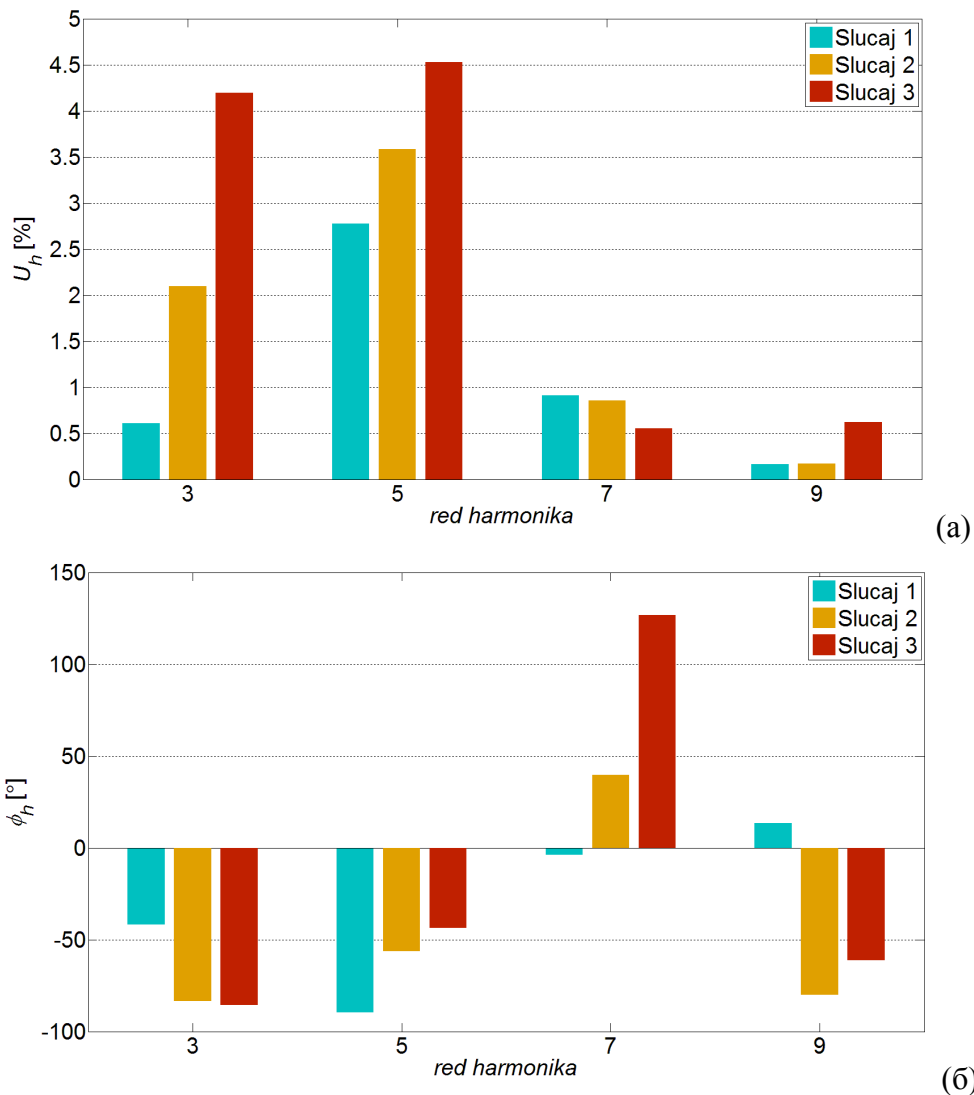
Таб. 6.2.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на амбијенталној температури $T=25^{\circ}\text{C}$ за различите напоне напајања

Метод	Показатељи	$0,9U_c$	$1,0U_c$	$1,1U_c$	σ [%]
HARM	I_{r1} [mA]	0,032	0,045	0,073	39,61
	I_{r3} [mA]	0,009	0,015	0,023	38,49
DIR	I_{rm} [mA]	0,057	0,067	0,063	9,28
P	P [W]	0,142	0,223	0,399	50,16
POW	I_{r1} [mA]	0,024	0,028	0,065	76,74
VCC	I_{r1} [mA]	0,032	0,045	0,073	39,61
ITER	C [nF]	0,149	0,149	0,150	0,39
	I_{r1} [mA]	0,034	0,048	0,077	38,73
COM	C [nF]	0,148	0,148	0,149	0,39
	I_{r1} [mA]	0,034	0,048	0,077	38,73
GA	C [nF]	0,148	0,149	0,150	0,55
	α	1,43	1,27	1,37	8,58
	k	0,020	0,022	0,031	24,20
	I_{r1} [mA]	0,034	0,048	0,077	38,73

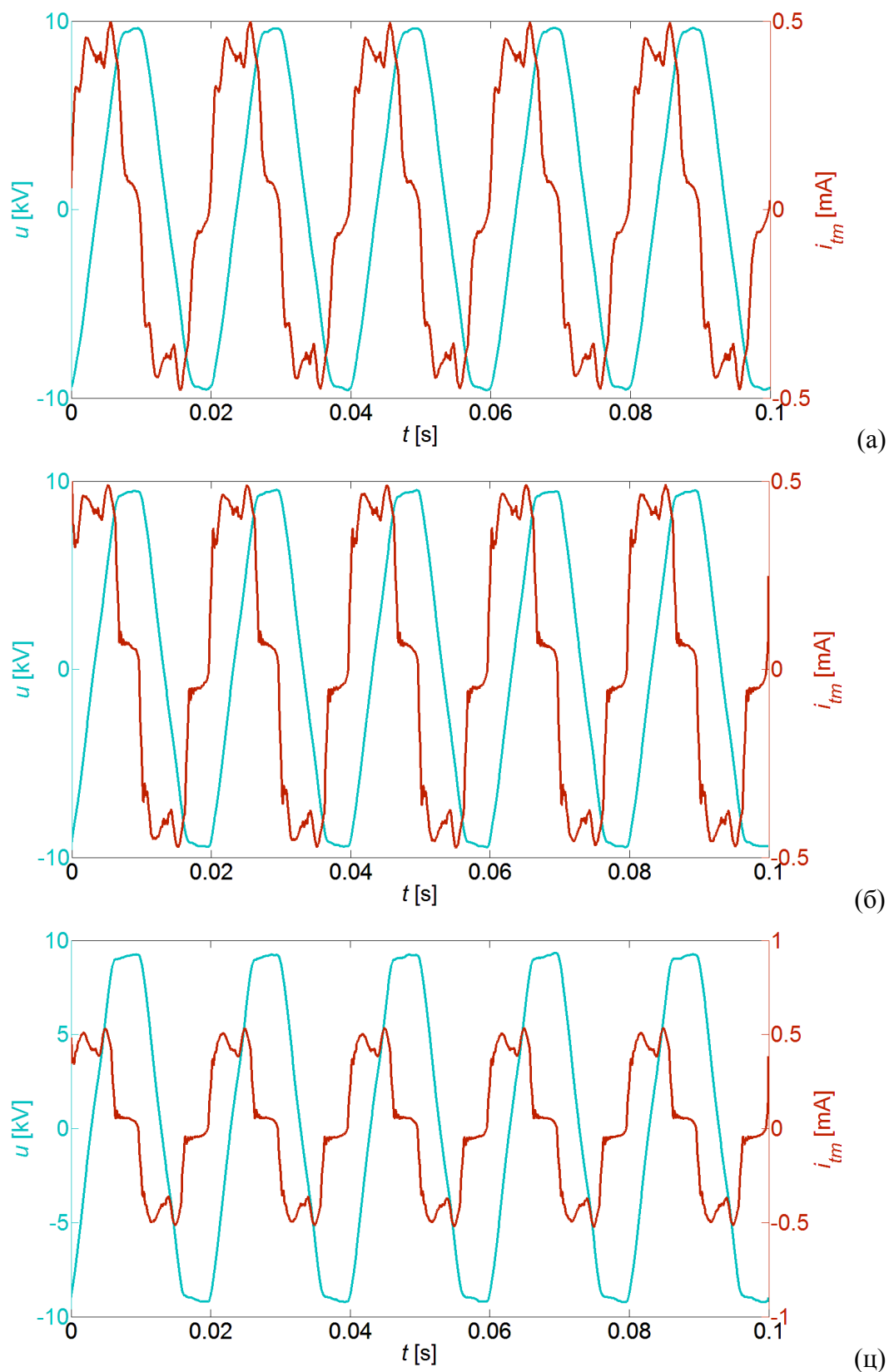
6.3. Мерења при различитим вредностима садржаја виших хармоника у напону напајања

У оквиру анализа приликом варирања садржаја виших хармоника у напону напајања, извршена су мерења напона напајања и струје одвођења при трајном радном напону на амбијенталној температури од 25°C . Три различита случаја садржаја виших хармоника су дефинисана постављањем отпорности отпорника R са Сл. 6.1.1 на вредности од $0\ \Omega$, $15\ \Omega$ и $30\ \Omega$. На Сл. 6.3.1 (а) су приказане амплитуде виших хармоника напона напајања за ова три случаја, а на Сл. 6.3.1 (б) њихови фазни ставови. Таласни облици напона (u) и укупне струје одвођења (i_{im}) снимљених за овакве вредности садржаја виших хармоника су приказани на Сл. 6.3.2. Користећи измерене вредности напона и укупне струје одвођења примењене су методе за мониторинг и дијагностику МОП-а и на основу њих одређени су показатељи стања МОП-а. Таласни облици резистивних струја одређених

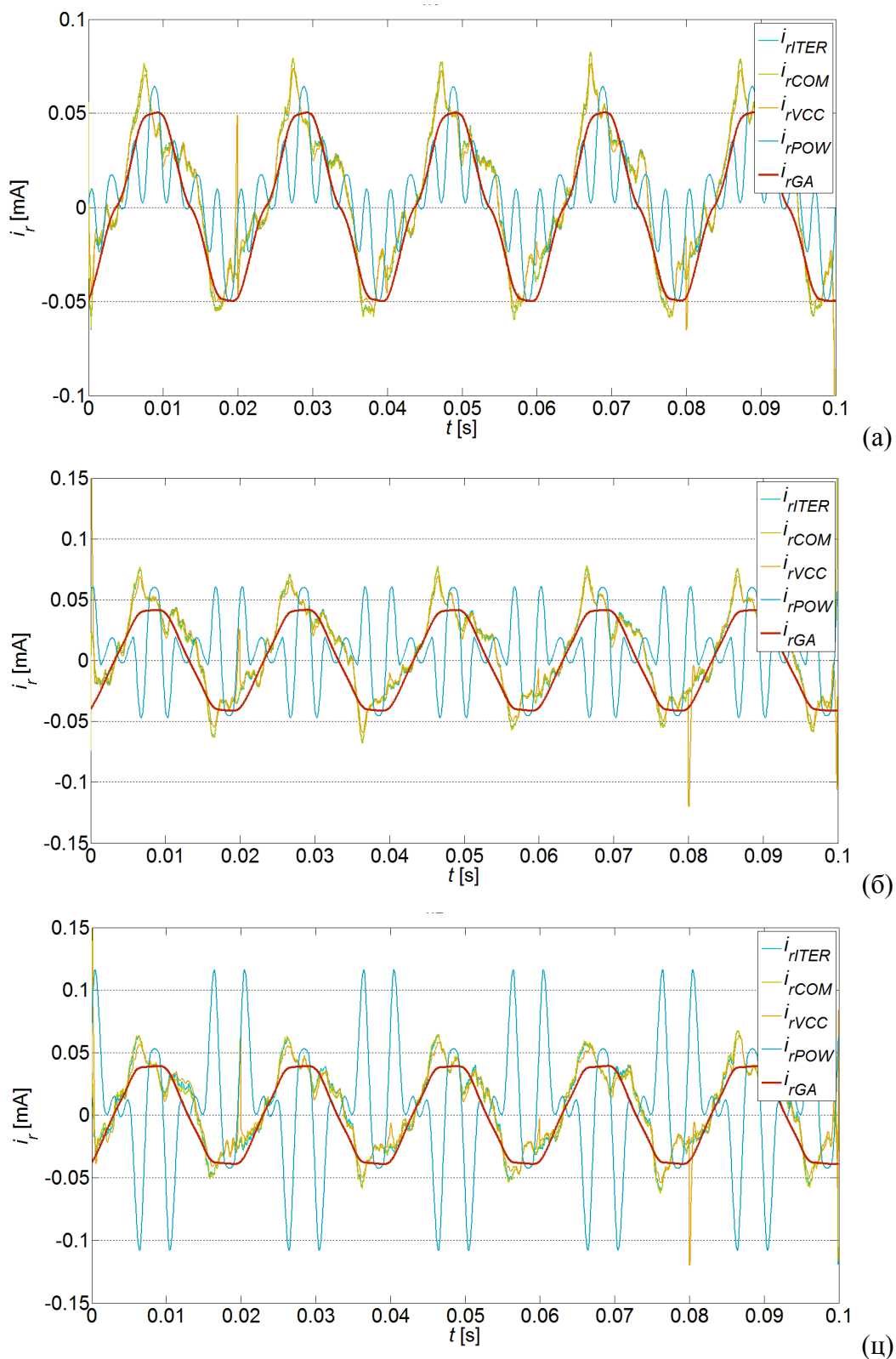
применом *VCC*, *COM*, *POW*, *ITER* и *GA* метода су приказани на Сл. 6.3.3. Са Сл. 6.3.3 се јасно може уочити утицај виших хармоника на *POW* методу. Такође се може уочити да се резистивне струје одређене *VCC*, *COM* и *ITER* методама и у случају већег садржаја виших хармоника практично веома добро поклапају док резистивна струја одређена *GA* методом има нешто другачији облик. Разлог овоме је објашњен у претходном поглављу (6.2). Измерене струје одвођења, као и укупна, капацитивна и резистивна струја одређене *GA* методом за сва три случаја су приказане на Сл. 6.3.4. Волт-амперске карактеристике одређене применом *GA* методе у сва три случаја су приказане на Сл. 6.3.5. Са Сл. 6.3.5 се може уочити да волт-амперска карактеристика одређена применом *GA* методе практично не зависи од садржаја виших хармоника.



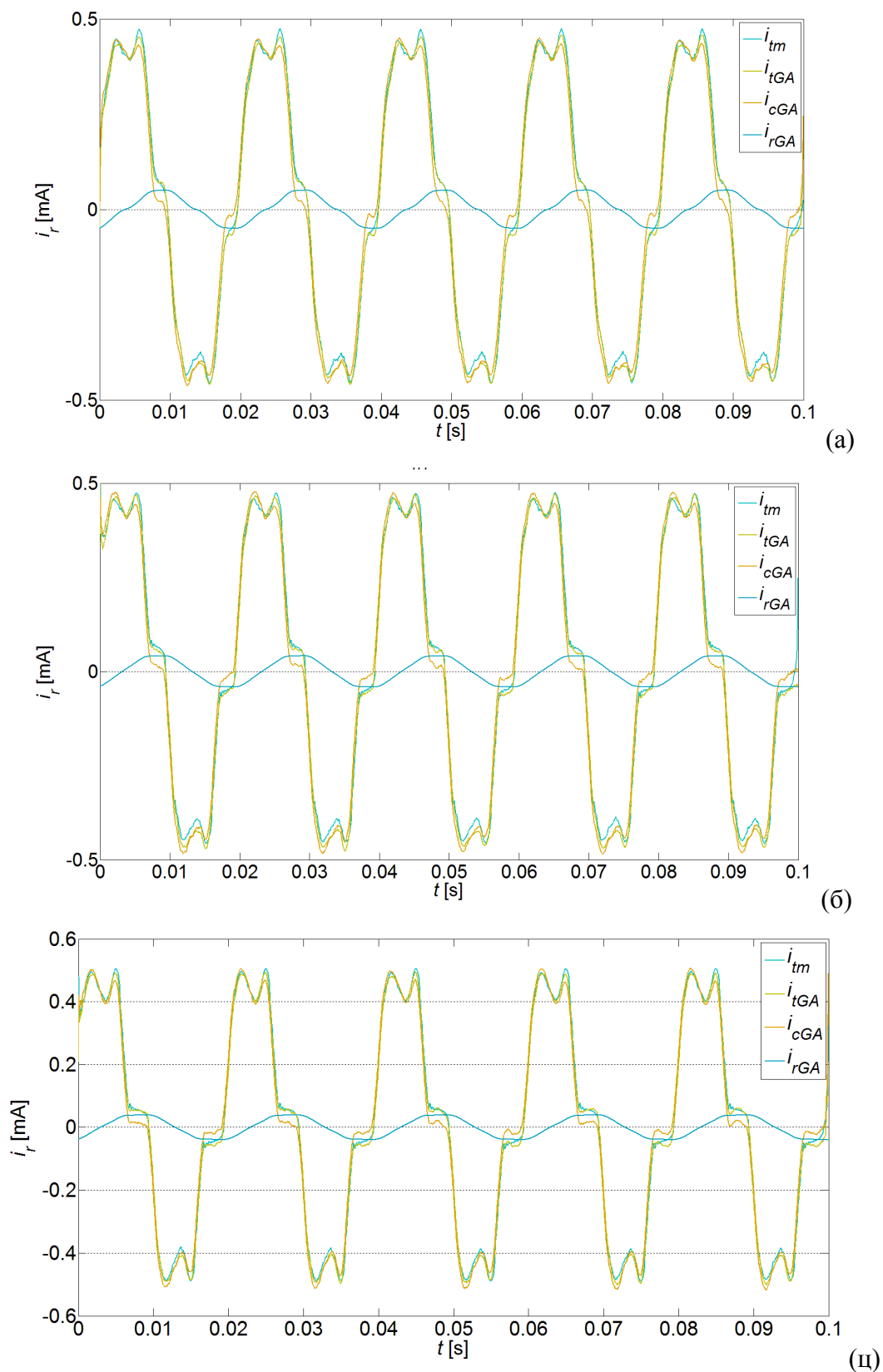
Сл. 6.3.1 Амплитуде (а) и фазни ставови (б) виших хармоника напона за анализирана три случаја



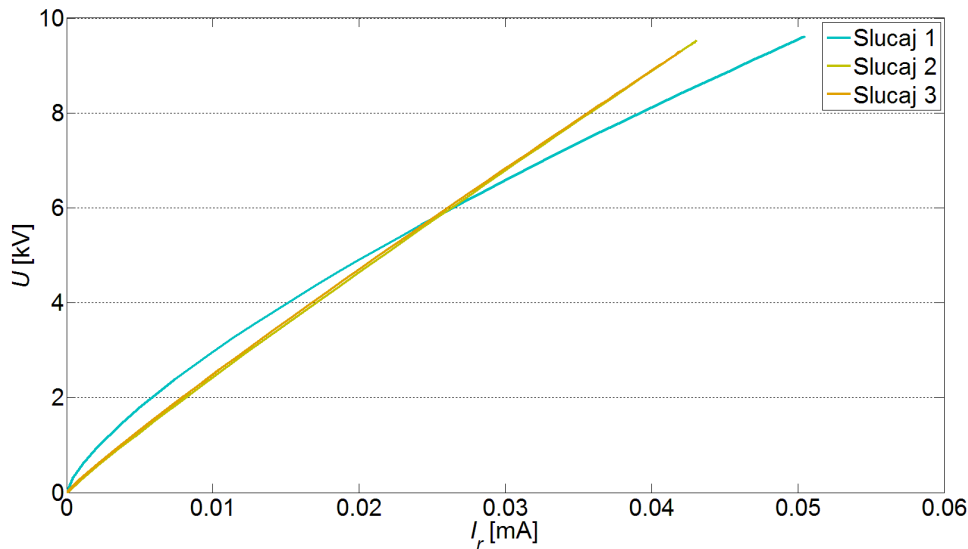
Сл. 6.3.2 Измерени сигнали напона и струје одвођења за три различита случаја садржаја виших хармоника у напону напајања (а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3



Сл. 6.3.3 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на $T_a=25^\circ\text{C}$ за (а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3



Сл. 6.3.4 Таласни облици измерене укупне струје на 25°C и укупне, капацитивне и резистивне струје одређене применом GA методе
(а) случај 1 (б) случај 2 (ц) случај 3



Сл. 6.3.5 Волт-амперске карактеристике одводника за различите случајеве садржаја виших хармоника у напону напајања

Вредности показатеља стања МОП-а и капацитивности МОП-а, одређених применом анализираних метода за мониторинг МОП-а су приказани у Таб. 6.3.1. Као што је и очекивано, варијација основног хармоника резистивне струје са варијацијом виших хармоника је мала, док је много више изражена варијација трећег хармоника резистивне компоненте. Варијација активне снаге губитака са променом хармоника је такође мала, сразмерна варијацији основног хармоника резистивне компоненте. Капацитивност МОП-а одређена *ITER*, *COM* и *GA* методама има практично исту вредност у свим случајевима. Што се тиче основног хармоника резистивне струје, може се закључити да *HARM* и *VCC* методе дају исте вредности, које се мало разликују од вредности прорачунатих *ITER*, *COM* и *GA* методама. Може се сматрати да су вредности основног хармоника резистивне струје одређене *POW* методом у овој анализи нетачне.

Што се тиче коефицијената k и α , могу се уочити мале варијације са променом садржаја виших хармоника. Мала вредност α показује да је зависност између напона и резистивне струје скоро линеарна у овом делу волт-амперске карактеристике.

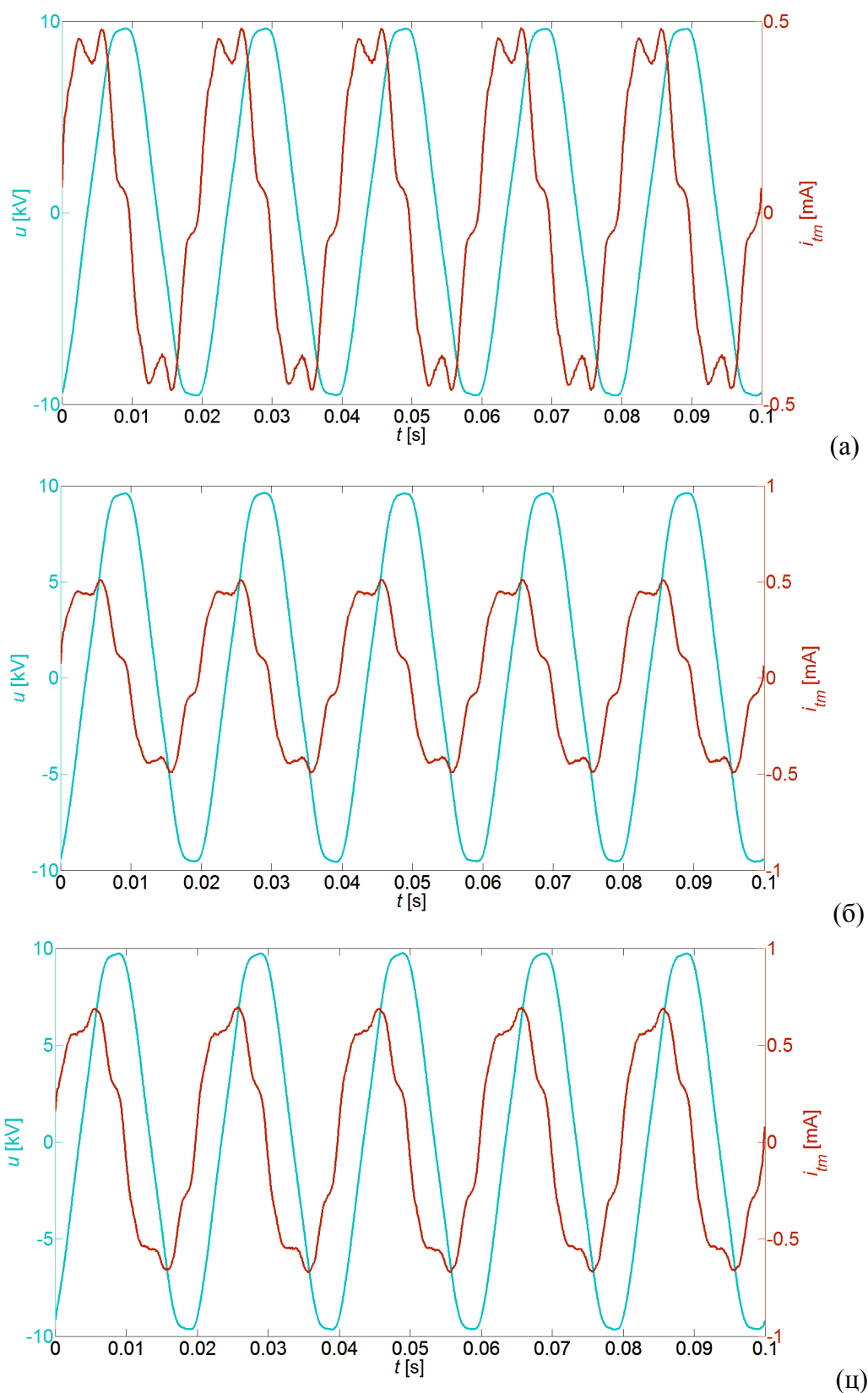
У Таб. 6.2.1 је такође приказана процентуална стандардна девијација показатеља у односу на случај 1 са најмањим садржајем виших хармоника. Према критеријуму квалитета показатеља који је раније дефинисан, показатељ је утолико бољи уколико је његова варијација мања.

Таб. 6.3.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на амбијенталној температури $T=25^{\circ}\text{C}$ за три различита случаја виших хармоника

Методe	Показатељи	Случај			σ [%]
		1	2	3	
HARM	I_{r1} [mA]	0,045	0,042	0,038	9,77
	I_{r3} [mA]	0,002	0,007	0,014	375,28
DIR	I_{rm} [mA]	0,075	0,067	0,072	6,58
P	P [W]	0,224	0,211	0,188	9,86
POW	I_{r1} [mA]	0,026	0	0,026	57,73
VCC	I_{r1} [mA]	0,045	0,042	0,038	9,77
ITER	C [nF]	0,147	0,147	0,148	0,39
	I_{r1} [mA]	0,048	0,045	0,041	9,16
COM	C [nF]	0,147	0,147	0,147	0
	I_{r1} [mA]	0,048	0,045	0,041	9,16
GA	C [nF]	0,147	0,147	0,147	0
	α	1,38	1,09	1,07	17,76
	k	0,023	0,020	0,020	10,65
	I_{r1} [mA]	0,048	0,045	0,042	8,07

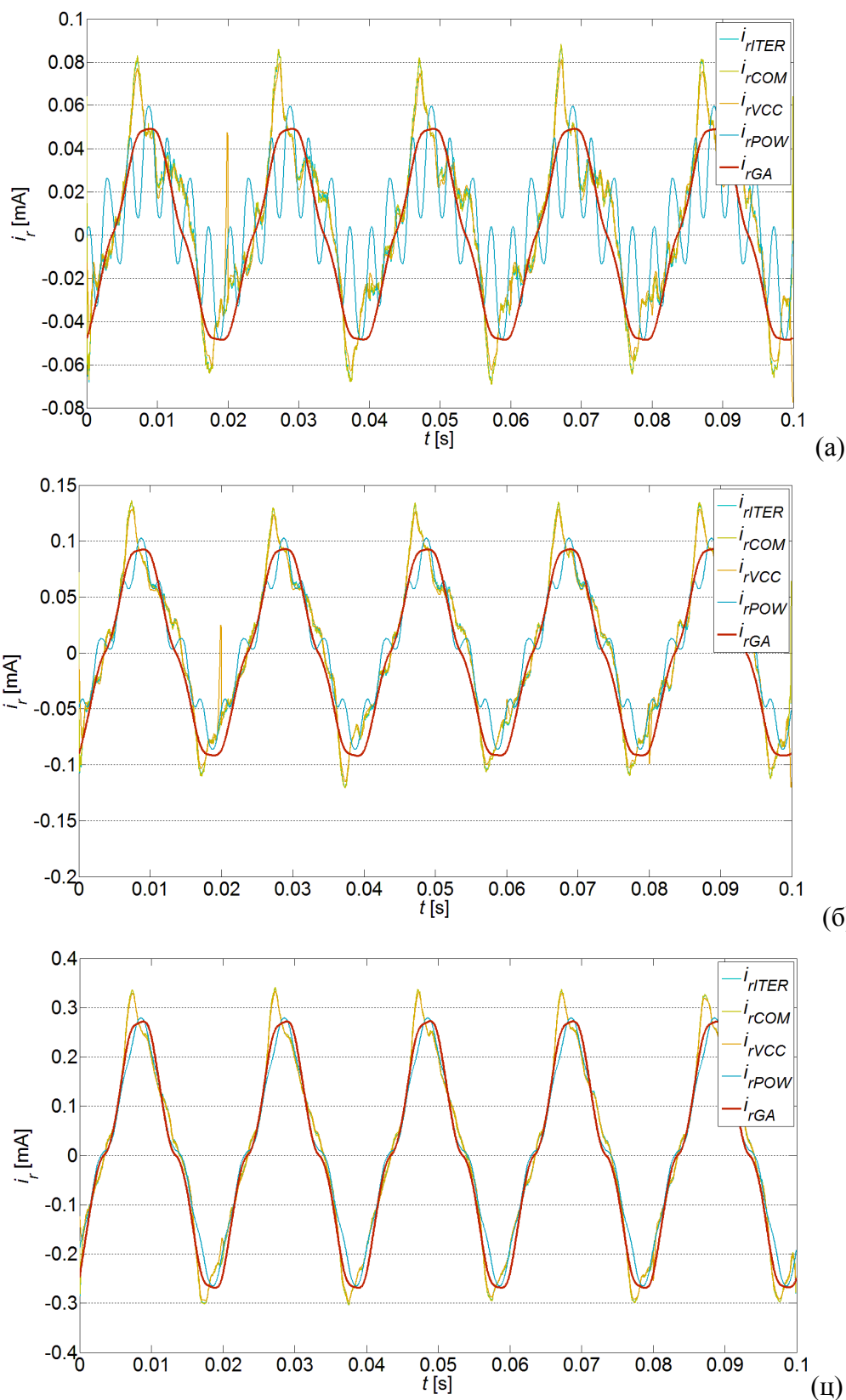
6.4. Мерења при различитим амбијенталним температурама

У оквиру ових анализа је вршено загревање одводника у комори која омогућава загревање МОП-а под напоном. Циљ загревања МОП-а јесте промена његове волт-амперске карактеристике како би се тестирале методе за мониторинг МОП-а и у овом случају. Потребно је подсетити се да различите врсте деградације МОП-а могу проузроковати различите промене волт-амперске карактеристике. Промена волт-амперске карактеристике проузрокована загревањем може одговарати неким од узрока деградације, поготово имајући у виду да свака деградација проузрокује и додатно загревање МОП-а. На Сл. 6.4.1 су приказани таласни облици напона и струја снимљених при амбијенталним температурама 25°C , 50°C и 100°C у случају напона напајања једнаком U_c .

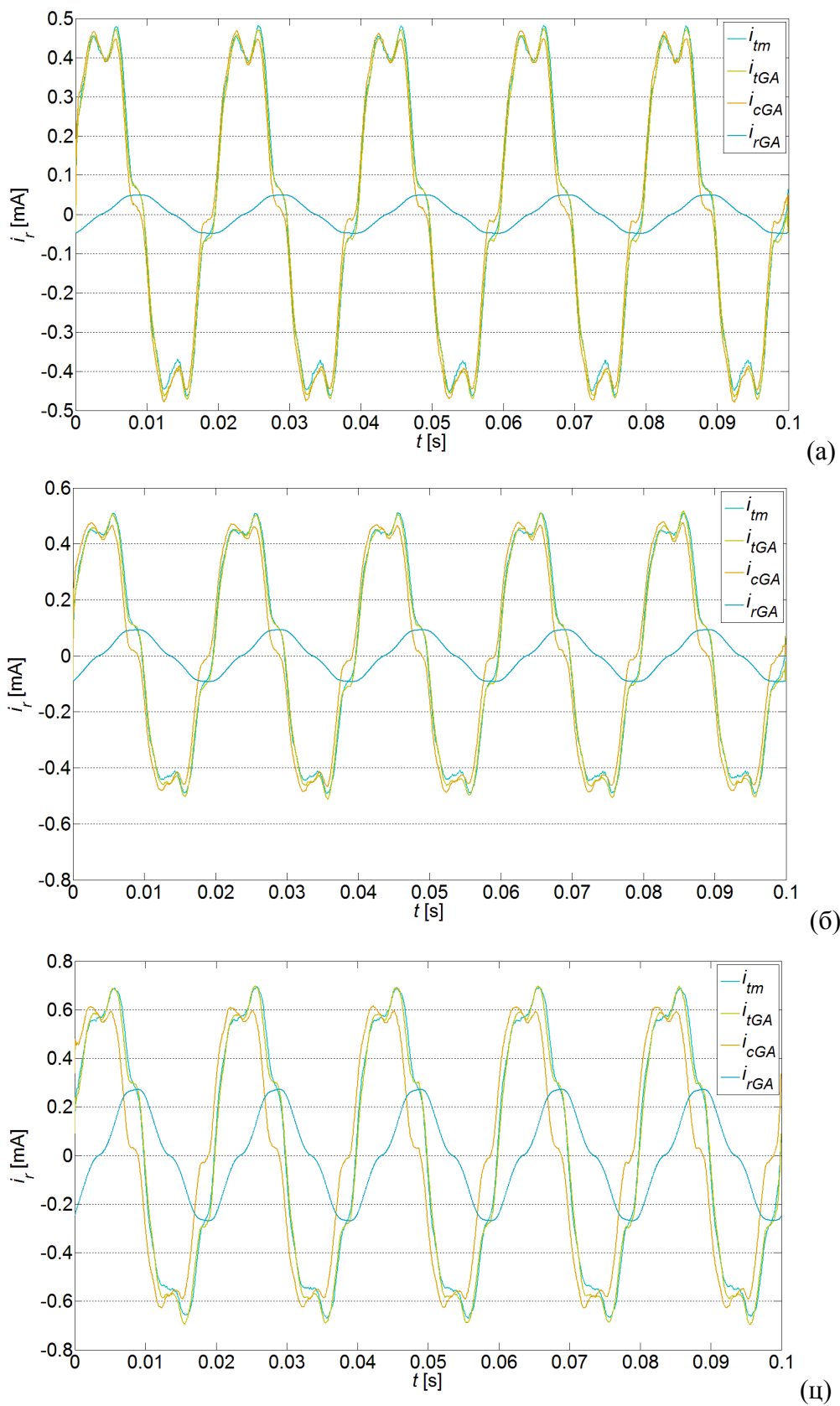


Сл. 6.4.1 Измерени сигнали напона и струје одвођења при напону напајања једнаком U_c , за три различите вредности амбијенталне температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C

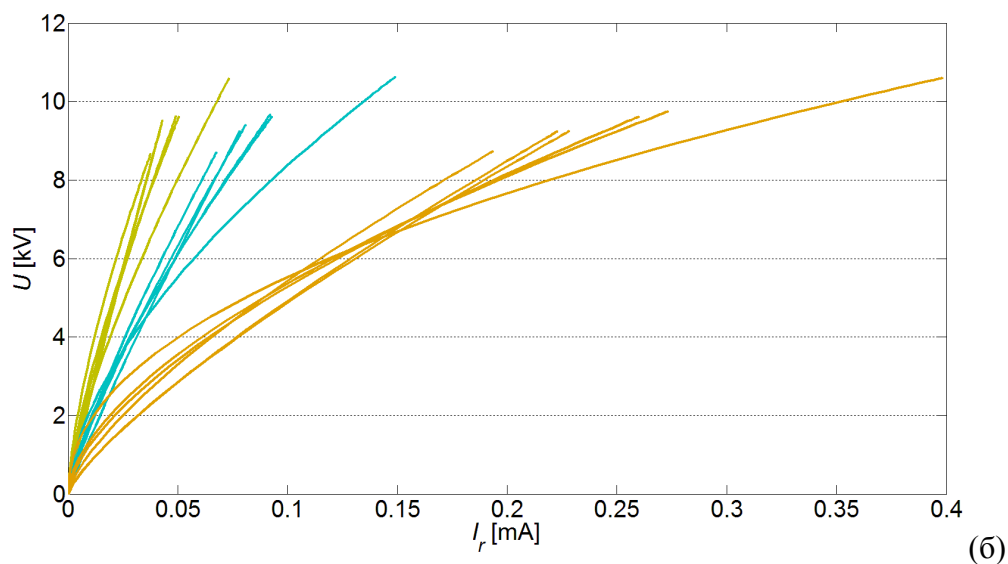
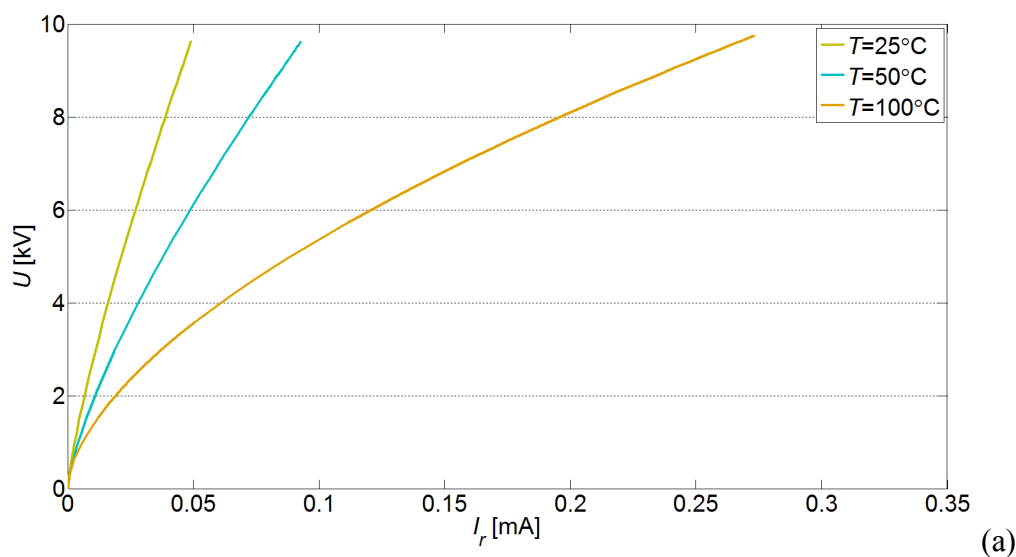
Таласни облици резистивних струја одређених применом *VCC*, *COM*, *POW*, *ITER* и *GA* метода су приказани на Сл. 6.4.2. За разлику од претходних анализа, у случају повишене температуре *POW* метода даје добре резултате. Разлог за ово је већа вредност резистивне струје па самим тим и њена лакша детекција. Такође се може уочити да се резистивне струје одређене *VCC*, *COM* и *ITER* методама и у овом случају веома добро поклапају, док резистивна струја одређена *GA* методом има нешто другачији облик. Измерене струје одвођења, као и укупна, капацитивна и резистивна струја одређене *GA* методом за сва три случаја су приказане на Сл. 6.4.3. Волт-амперске карактеристике одређене применом *GA* методе у сва три случаја су приказане на Сл. 6.4.4(а). Са Сл. 6.4.4(а) се може уочити јасна промена волт-амперске карактеристике у случају загревања МОП-а. Да би се ове промене упоредиле са променама које су детектоване при различитим напонима напајања и различитим садржајима виших хармоника, за сваку температуру је вариран напон напајања и садржај виших хармоника. Волт-амперске карактеристике за све ове случајеве су приказане на Сл. 6.4.4(б). Може се уочити да су промене волт-амперске карактеристике као последица температуре веће него што су то варијације услед напона напајања и виших хармоника напона. Међутим, у случају малих температурних разлика, а приликом варијације напона напајања може доћи до погрешне интерпретације резултата. Из тог разлога је потребно поредити волт-амперске карактеристике добијене при истим радним напонима мреже.



Сл. 6.4.2 Прорачунате резистивне струје на основу мерења на три различите температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C



Сл. 6.4.3 Таласни облици измерене укупне струје и укупне и резистивне струје одређене применом GA методе за три различите вредности амбијенталне температуре (а) 25°C (б) 50°C (ц) 100°C



Сл. 6.4.4 Волт-амперске карактеристике одводника у случају различитих амбијенталних температура одређене *GA* методом
(а) при напону напајања U_c (б) при варијацији напона и виших хармоника

Вредности показатеља стања МОП-а и капацитивности МОП-а, одређених применом анализираних метода за мониторинг МОП-а су приказани у Таб. 6.3.1. Као што је и очекивано, варијација основног хармоника резистивне струје са варијацијом виших хармоника је мала, док је много више изражена варијација трећег хармоника резистивне компоненте. Варијација активне снаге губитака са променом хармоника је такође мала, сразмерна варијацији основног хармоника резистивне компоненте. Капацитивност МОП-а одређена *ITER*, *COM* и *GA* методама има практично исту вредност у свим случајевима. Што се тиче основног хармоника резистивне струје, може се закључити да *HARM* и *VCC* методе дају

исте вредности, које се мало разликују од вредности прорачунатих *ITER*, *COM* и *GA* методама. Може се сматрати да су вредности основног хармоника резистивне струје одређене *POW* методом у овој анализи нетачне.

Што се тиче коефицијената k и α , могу се уочити мале варијације коефицијента α , међутим значајне варијације коефицијента k . У Таб. 6.3.1 је такође приказана процентуална стандардна девијација показатеља у односу на случај када је температура једнака 25°C . Према критеријуму квалитета показатеља који је раније дефинисан, у овом случају је показатељ утолико бољи уколико је његова варијација већа. Може се закључити да су два најбоља показатеља основни хармоник резистивне струје и коефицијент k којим је дефинисан изглед волт-амперске карактеристике.

Таб. 6.4.1 Показатељи стања МОП-а одређени на основу мерења на различитим температурама

Метод	Показатељи	T_a [$^{\circ}\text{C}$]			σ [%]
		25	50	100	
HARM	I_{r1} [mA]	0,045	0,088	0,247	264,97
	I_{r3} [mA]	0,015	0,012	0,015	11,55
DIR	I_{rm} [mA]	0,067	0,113	0,273	181,88
P	P [W]	0,223	0,425	1,227	265,14
POW	I_{r1} [mA]	0,028	0,072	0,224	414,20
VCC	I_{r1} [mA]	0,045	0,086	0,246	263,19
ITER	C [nF]	0,149	0,158	0,202	20,83
	I_{r1} [mA]	0,048	0,089	0,251	249,10
COM	C [nF]	0,148	0,157	0,201	20,97
	I_{r1} [mA]	0,048	0,089	0,251	249,10
GA	C [nF]	0,149	0,159	0,202	20,90
	α	1,27	1,362	1,684	19,28
	k	0,022	0,042	0,119	259,91
	I_{r1} [mA]	0,048	0,090	0,251	249,34

7. ЗАКЉУЧАК

У овој дисертацији је обрађена проблематика мониторинга и дијагностике стања металоксидних одводника пренапона. Поред кратког прегледа актуелних *on-line* и *off-line* метода за мониторинг МОП-а, дат је детаљан приказ метода базираних на анализи струје одвођења при радном напону мреже. Поред анализа постојећих метода, у оквиру докторске дисертације је развијена и нова метода за мониторинг МОП-а базирана на мерењима напона напајања и укупне струје одвођења и примени генетског алгоритма. У циљу компаративне анализе метода извршене су рачунарске симулације и експериментална испитивања реалног средњенапонског одводника пренапона. Анализиране су следеће методе: *HARM*, *DIR*, *POW*, *P*, *VCC*, *COM*, *ITER* и новоразвијена *GA* метода. Показатељи стања МОП-а који се могу одредити овим методама и који су анализирани у оквиру симулација и експеримената су основни и трећи хармоници укупне и резистивне струје одвођења и активна снага губитака. *POW*, *VCC*, *COM*, *ITER* и *GA* метода одређују таласни облик резистивне струје па самим тим омогућавају и прорачун било ког од наведених показатеља стања МОП-а. Додатно, *GA* метода одређује и коефицијенте k и α који дефинишу изглед волт-амперске карактеристике МОП-а и који су анализирани као потенцијални показатељи стања.

У оквиру рачунарских симулација спроведене су анализе тачности метода за мониторинг МОП-а, као и анализе поузданости показатеља стања МОП-а. Анализама је показано да промена стања МОП-а и флукуација напона имају занемарљив утицај на тачност самих метода за мониторинг, док присуство виших хармоника у напону напајања изазива смањење тачности методе хармонијске анализе резистивне струје одвођења (*HARM*), методе директног одређивања резистивне струје (*POW*) и итеративне процедуре за одређивање резистивне струје одвођења (*ITER*). Међутим, у случају уважавања чињенице постојања фазног помераја између капацитивне и нелинеарне струје одвођења који је мањи од 90° , грешке свих метода које користе упрошћене моделе МОП-а се повећавају. У овој дисертацији је такође анализиран утицај грешке фазног помераја напона напајања и струје одвођења. Имајући у виду да једино *GA* метода омогућава уважавање ове грешке, очекивано је грешка *GA* методе занемарљива у овом случају, док се грешке осталих метода знатно повећавају. Ова особина *GA* методе,

тј. уважавање фазног помераја између напона и струје одвођења елиминира потребу за синхроним мерењем напона и струје. Ово је један од битних доприноса развијене методе имајући у виду да је једно од главних ограничења примене појединих метода у погону управо потреба за синхроним мерењем ових величина.

Са аспекта поузданости показатеља МОП-а анализирана је осетљивост показатеља на промену стања МОП-а као и осетљивост на флукуацију напона и промену садржаја виших хармоника у напону напајања. За квантификацију осетљивости показатеља је у овој дисертацији уведена апсолутна вредност првог извода релативне промене показатеља у тачки у којој коефицијент нелинеарности одговара новом одводнику. Највећу осетљивост показују активна снага губитака и основни хармоник резистивне струје, док је основни хармоник укупне струје најгори показатељ са аспекта осетљивости. У циљу квантификације утицаја флукуације напона и садржаја виших хармоника у напону напајања уведен је појам маргине показатеља стања. Маргина се може наћи у опсегу од -1 до 1, а већа вредност маргине дефинише бољи показатељ стања. Са овог аспекта најбољи показатељи су коефицијент α и основни хармоник резистивне компоненте струје, док су и у овом случају најгори показатељи основни и трећи хармоник укупне струје одвођења. Треба напоменути да је промена стања МОП-а дефинисана променом коефицијента α , као што је то у релевантној литератури рађено, док је за коефицијент k усвојена константна вредност јер промена овог коефицијента са деградацијом МОП-а није била раније анализирана. Као основни закључак рачунарских симулација се може констатовати да је најбољи показатељ стања по готово свим критеријумима основни хармоник резистивне компоненте, док се коефицијенти k и α намећу као потенцијално добри показатељи стања МОП-а које је потребно додатно анализирати.

У оквиру експерименталних испитивања извршена су мерења на средњенапонском одводнику пренапона типа MWK 7, трајног радног напона 7 kV. Вршена су мерења напона напајања одводника и укупне струје одвођења са циљем примене свих анализираних метода за мониторинг МОП-а. Мерења су вршена у различитим условима напајања са аспекта амплитуде напона, садржаја виших хармоника у напону и амбијенталне температуре. Циљ ових мерења је било одређивање показатеља стања МОП-а применом анализираних метода, као и

анализа варијације показатеља са променом услова напајања и променом волт-амперске карактеристике МОП-а. Промена волт-амперске карактеристике је вршена управо загревањем МОП-а у комори за загревање под напоном. Подизањем температуре МОП-а се симулира његова деградација. Резултати експерименталних анализа се поклапају са очекиваним резултатима добијеним рачунарским симулацијама. Као најбољи показатељ стања МОП-а се истиче основни хармоник резистивне компоненте са малим варијацијама у случају промене напона напајања и садржаја виших хармоника и великим варијацијама у случају загревања МОП-а. Међутим, поред основног хармоника резистивне струје и коефицијент k се показао као одличан показатељ стања МОП-а. Наиме, коефицијент k доминантно одређује изглед волт-амперске карактеристике у области малих струја, док је коефицијент нелинеарности α показао мале варијације са променом температуре. Као основни закључак се може навести да се применом GA методе могу поуздано одредити одлични показатељи стања МОП-а, основни хармоник резистивне компоненте и коефицијенти k и α , које је као показатеље потребно посматрати као уређени пар који дефинише изглед волт-амперске карактеристике. У случају примене ових показатеља за потребе доношења одлуке о стању МОП-а потребно је водити рачуна о напону напајања МОП-а, тј. поредити показатеље актуелног са показатељима претходних мерења у истим условима напајања и истим амбијенталним условима.

На основу свега реченог се може извести закључак да је за потребе мониторинга и дијагностике стања МОП-а потребно вршити периодична мерења и статистичку анализу што већег броја релевантних показатеља стања. У ову сврху се може користити новоразвијена GA метода, која у односу на остале методе стиче благу предност јер се њоме могу поуздано одредити сви релевантни показатељи који се одређују другим методама, може се одредити волт-амперска карактеристика са коефицијентима k и α који су уведени као нови показатељи стања, могу се елиминисати потенцијалне грешке мерења и не постоји потреба за синхроним мерењем које може бити ограничавајући фактор осталих метода.

Даља истраживања из ове области се крећу у правцу примене GA методе за одређивање показатеља стања вештачки деградираних одводника. Имајући у виду да поједини узроци деградације могу довести до промене само једног дела волт-

амперске карактеристике, за ове потребе би требало волт-амперску карактеристику у области малих струја поделити на неколико области. Број ових области и тачке поделе би такође могле бити одређене у оквиру оптимизационе процедуре генетског алгорита. Као једна од главних предности *GA* методе је наведена елиминација потребе за синхроним мерењем напона и струје, међутим примена *GA* методе потенцијално отвара могућности потпуне елиминације напонског сигнала из алгорита. У ову сврху би било потребно увести претпоставку о непроменљивости капацитивности МОП-а са деградацијом како би се елиминисао проблем вишеструких решења. Међутим, ова претпоставка је оправдана на основу многих испитивања која су до сада спроведена у пракси.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Christian Heinrich and Volker Hinrichsen, "Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks—Comparison of Existing and Newly Developed Procedures," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 1, 2001.
- [2] Kari Kannus and Kari Lahti, "Evaluation of the Operational Condition and Reliability of Surge Arresters Used on Medium Voltage Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, 2005.
- [3] M. Gumede and G. Frederick D'Almaine, "Surge Arrester Faults and Their Causes at EThekweni Electricity," *International Journal of Electrical Energy*, vol. 2, no. 1, 2014.
- [4] H. R. P. M. De Oliveira et al., "New Techniques for Field Inspection of Medium Voltage Surge Arresters," in *IEEE PowerTech 2007*, 2007, pp. 39-44.
- [5] Volker Hinrichsen, "Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arresters," , Bilbao, 1997.
- [6] Zhi-niu Xu, Li-juan Zhao Zhao, Ao Ding, and Fang-cheng Lü, "A Current Orthogonality Method to Extract Resistive Leakage Current of MOSA," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, 2013.
- [7] S. R. Naidu and K. D. Srivastava, "The validity of circuits for measuring the resistive leakage current of zinc oxide arresters," , 1987.
- [8] S. Shirakawa et al., "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, 1988.
- [9] R.T. De Souza, E.G. Da Costa, S.R. Naidu, and M.J. DE A. Maia, "A virtual bridge to compute the resistive leakage current waveform in ZnO surge arresters," in *2004 IEEUPES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*,

2004.

- [10] Hanxin Zhu and M. R. Raghuveer, "Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, 2001.
- [11] Wang Yongqiang and Lu Fangcheng, "Influence of Power System's Harmonic Voltage on Leakage Current of MOA," in *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Hangzhou.China, 2003.
- [12] Novizon, Abdul-Malek Zulkurnain, Bashir Nouruddeen , and Aulia, "Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arresters," in *Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software.*: InTech, 2011.
- [13] J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei, and B. Hansen, "New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, 1990.
- [14] Chandana Karawita and M. R. Raghuveer, "Onsite MOSA Condition Assessment—A New Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, 2006.
- [15] Tong Zhao, Qingmin Li, and Jiali Qia, "Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, 2005.
- [16] Turgut Taskin, "Introduction of a Measurement System to Monitor the Condition of ZnO Surge Arresters," in *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000.
- [17] Bok-Hee Lee and Sung-Man Kang, "A new on-line leakage current monitoring system of ZnO surge arresters," *Materials Science and Engineering*, vol. 119, pp. 13-18, 2005.
- [18] Guo Hui, Tang Xianfeng, Chang Zhengwei, and Fang Yu, "Application Kohonen

Neural Network to MOA Fault Diagnosis," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 568-570, pp. 874-878, 2014.

[19] NOVIZON and Abdul-Malek Zulkurnain, "Correlation between third harmonic leakage current and thermography image of zinc oxide surge arresters for fault monitoring using artificial neural network," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 554, pp. 598-602, 2014.

[20] E. T. Wanderley Neto, E. G. Da Costa, and M. J. A. Maia, "Artificial Neural Networks Used for ZnO Arresters Diagnosis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, 2009.

[21] George R. S. Lira, Edson G. Costa, and Carlos W. D. Almeida, "Self-Organizing Maps Applied to Monitoring and Diagnosis of ZnO Surge Arresters," in *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2010.

[22] George R. S. Lira and Edson G. Costa, "MOSA Monitoring Technique Based on Analysis of Total Leakage Current," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, 2013.

[23] George R. S. Lira, Edson G. Costa, and Tarso V. Ferreira, "Metal-oxide surge arrester monitoring and diagnosis by self-organizing maps," *Electric Power Systems Research*, vol. 108, 2014.

[24] Zoran Stojanovic and Zlatan Stojkovic, "Evaluation of MOSA condition using leakage current method," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 52, 2013.

[25] Masume Khodsuz, Mohammad Mirzaie, and Seyyedmeysam Seyyedbarzegar, "Metal oxide surge arrester condition monitoring based on analysis of leakage current components," vol. 66, 2015.

[26] Goran Dobrić, Zoran Stojanović, and Zlatan Stojković, "The application of genetic algorithm in diagnostics of metal-oxidesurge arrester," *Electric Power Systems*

Research, vol. 119, 2015.

- [27] Walter Gander, *Learning MATLAB: A Problem Solving Approach.*: Springer, 2015.
- [28] Stephen J. Chapman, *MATLAB Programming for Engineers.*: Cengage Learning, 2016.
- [29] Milan Savić and Zlatan Stojković, *Tehnika visokog napona - atmosferski prenaponi.* Beograd: Elektrotehnički fakultet, 2001.
- [30] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, and K. B. Stump, "Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems ," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, 1989.
- [31] E.C. Sakshaug, J.S. Kresge, and S.A. Miske, "A new concept in station arrester design," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 2, 1977.
- [32] ABB Switzerland Ltd., "Overvoltage protection - Metal oxide surge arresters in medium voltage systems," Wettingen, 2011.
- [33] I. A. Metwally, "Performance of distribution-class surge arresters under dry and artificial pollution conditions," *Electrical Engineering*, vol. 93, no. 1, pp. 55-62, 2011.
- [34] Daiana Antonio Da Silva et al., "Reliability of directly-molded polymer surge arresters: Degradation by immersion test versus electrical performance," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, 2013.
- [35] ABB Switzerland , "High Voltage Surge Arresters - Buyer's Guide,".
- [36] S. Shirakawa et al., "Diagnostics of Surge Arresters Using High Voltage Gradient ZnO Elements for the 800kV GIS by UHF Partial Discharge Methods," in *High Voltage Engineering Symposium*, 1999.
- [37] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, and T. Nitta, "Stability and

long term degradation of metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1548-1556, 1980.

- [38] Estácio Tavares Wanderley Neto, Aelfcleniton Mouroner Maciel Diniz, Manuel Luís Barreira Martinez, and Bruno Souza Nanni Campos, "Automatic disconnecter: Influence on the performance of mediumvoltage arresters and a new design proposal," *Electric Power Systems Research*, vol. 118, 2015.
- [39] Y. Fujiwara, Y. Shibuya, M. Imataki, and T. Nitta, "Evaluation of surge degradation of metal oxide surge arrester," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 4, pp. 978-985, 1982.
- [40] J.T.C. Van Kemenade and R.K. Eijthoven, "Direct determination of barrier voltage in ZnO varistors," *AIP Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 2, 1979.
- [41] "C62.11: IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV)," 2005.
- [42] "C62.22: IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems," 2009.
- [43] "IEC 60099-4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems," 2006.
- [44] "IEC 60099-5: Surge arresters – Selection and application recommendations," 2000.
- [45] Joe Osterhout, "Comparison of IEC and U.S. standards for metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 2002-2010, 1992.
- [46] O. Nigol, "Methods for analyzing the performance of gapless metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, 1992.
- [47] IEEE WORKING GROUP 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters,"

IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, 1992.

- [48] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, 1999.
- [49] F. Fernandez and R. Diaz, "Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations," , 2001.
- [50] C.A. Christodoulou, I.F. Gonos, and I.A. Stathopoulos, "Estimation of the parameters of metal oxide gapless surge arrester equivalent circuit models using genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, 2011.
- [51] A. Bargigia, M. De Nigris, A. Pignini, and A. Sironi, "Comparison of different test methods to assess the thermal stresses of metal oxide surge arresters under pollution conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, 1993.
- [52] W.G. Carlson, T.K. Gupta, and A. Sweetana, "A procedure for estimating the lifetime of gapless metal oxide surge arresters for ac application," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRD-1, no. 2, pp. 67-74, 1986.
- [53] Alain VICAUD, "AC voltage ageing of zinc - oxide ceramics," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRD-1, no. 2, pp. 49-58, 1986.
- [54] F. R. Stockum, "Simulation of the nonlinear thermal behavior of metal oxide surge arresters using a hybrid finite difference and empirical model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 306-313, 1994.
- [55] M.V. Lat, "Thermal properties of metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 7, pp. 2194-2202, 1983.
- [56] M.V. Lat, "Analytical method for performance prediction of metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 10, pp. 2665-2674, 1985.

- [57] Andre Petit, Xuan-Dai Do, and Guy St-Jean, "An experimental method to determine the electro-thermal model parameters of metal oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 715-721, 1991.
- [58] Andre Hamel and Guy St-Jean, "Comparison of ANSI, IEC and CSA standards' durability requirements on station-type metal oxide surge arresters for EHV power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1283-1298, 1992.
- [59] K. G. Ringler, P. Kirkby, C. C. Erven, M. V. Lat, and T. A. Malkiewicz, "The energy absorption capability and time-to-failure of varistors used in station-class metal-oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, 1997.
- [60] Howard Shaw and Nils Holmgren, "Characteristics which can be used to detect defective distribution surge arresters," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 1, pp. 137-141, 1985.
- [61] K. L. Wong, "Electromagnetic Emission Based Monitoring Technique for Polymer ZnO Surge Arresters," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 1, 2006.
- [62] Shyh-Jier Huang and Chien-Hsien Hsieh, "A method to enhance the predictive maintenance of ZnO arresters in energy systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, 2014.
- [63] T.V. Ferreira, E.G. Da Costa, Max G.G. Neri, and Estácio T. W. Neto, "Application of an Optical Temperature Measurement System on ZnO Surge Arrester Experiments," in *IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italy, 2006.
- [64] Zoran Stojanović and Zlatan Stojković, *Monitoring i dijagnostika metaloksidnih odvodnika prenapona*. Beograd: Akademska misao, 2014.

- [65] Kari Lahti, Kari Kannus, and Kirsi Nousiainen, "Diagnostic Methods in Revealing Internal Moisture in Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, 2002.
- [66] Larry T. Coffeen and James E. McBride, "High voltage AC resistive current measurements using a computer based digital watts technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 550-556, 1991.
- [67] Zhou Long and et al., "A study on variable coefficient ceompensation method and performance diagnosis of metal oxide arrester's operation state detection," *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 13, no. 6, 1998.
- [68] Yan Xianglian, Wen Yuanfang, and Yi Xiaoyu, "Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOV Surge Arrester," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, 2002.
- [69] Hanxin Zhu and M.R. Raghuveer, "Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics," in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1999.
- [70] G. Dobrić, Z. Stojanović, Z. Stojković, and M. Savić, "Modelovanje odvodnika prenapona primenom evolutivnih algoritama," in *INFOTEH 2014, Jahorina*, 2014.
- [71] G. Dobrić, Z. Stojanović, and Z. Stojković, "Uticaj fazne greške mernih transformatora na performanse genetskog algoritma za monitoring i dijagnostiku MOP-a," in *CIGRE, Zlatibor*, 2015.
- [72] H. J. Li, S. Birlasekaran, and S. S. Choi, "A Parameter Identification Technique for Metal-Oxide Surge Arrester Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 3, 2002.
- [73] Bayadi Abdelhafid, "Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, 2008.

- [74] G. R. S. Lira, D. Fernandes Jr., and E. G. Costa, "Parameter identification technique for a dynamic metal-oxide surge arrester model," in *International Conference on Power Systems Transients*, Kyoto, Japan, 2009.
- [75] M. Nafar, G.B. Gharehpetian, and T. Niknam, "Improvement of estimation of surge arrester parameters by using Modified Particle Swarm Optimization," *Energy*, vol. 36, 2011.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1 - Извођење везе између капацитивности МОП-а

Као што је описано у поглављу 3.8, резистивна компонента струје и резистивни напон достижу максималне вредности у истом тренутку:

$$\left. \frac{di_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \left(\frac{di_t}{dt} - C \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \right) \Big|_{t=t_m} = 0 \quad (\text{П.1.1})$$

$$\left. \frac{du_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \left(\left(1 + \frac{C}{C_s} \right) \cdot \frac{du}{dt} - \frac{i_t}{C_s} \right) \Big|_{t=t_m} = 0 \quad (\text{П.1.2})$$

Нека су измерене вредности напона и струје представљене Фуријеовим редом:

$$u = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)) \quad (\text{П.1.3})$$

$$i_t = \sum_{k=0}^{\infty} (p_k \cos(k\omega t) + q_k \sin(k\omega t)) \quad (\text{П.1.4})$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T u \cdot \cos(k\omega t) \cdot dt \quad (\text{П.1.5})$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T u \cdot \sin(k\omega t) \cdot dt \quad (\text{П.1.6})$$

$$p_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_t \cdot \cos(k\omega t) \cdot dt \quad (\text{П.1.7})$$

$$q_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_t \cdot \sin(k\omega t) \cdot dt \quad (\text{П.1.8})$$

Заменом претходних једначина, добија се:

$$\left. \frac{di_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \sum_{k=0}^{\infty} [k\omega(q_k + k\omega C a_k) \cos(k\omega t_m) - k\omega(p_k - k\omega C b_k) \sin(k\omega t_m)] = 0 \quad (\text{П.1.9})$$

$$\left. \frac{du_r}{dt} \right|_{t=t_m} = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ k\omega \left[\left(1 + \frac{C}{C_s} \right) b_k - \frac{1}{C_s} \frac{p_k}{k\omega} \right] \cos(k\omega t_m) - k\omega \left[\left(1 + \frac{C}{C_s} \right) a_k + \frac{1}{C_s} \frac{q_k}{k\omega} \right] \sin(k\omega t_m) \right\} = 0 \quad (\text{П.1.10})$$

Претпостављајући да су основни хармоници резистивне компоненте струје и резистивног напона у фази, добија се:

$$\frac{p_1 - \omega C b_1}{q_1 + \omega C a_1} = \frac{\left(1 + \frac{c}{c_s}\right) a_1 + \frac{1}{c_s} \frac{q_1}{\omega}}{\left(1 + \frac{c}{c_s}\right) b_1 - \frac{1}{c_s} \frac{p_1}{\omega}} \quad (\text{П.1.11})$$

$$C_s = \frac{p_1^2 + q_1^2 + 2\omega C \cdot (a_1 q_1 - b_1 p_1) + \omega^2 C^2 \cdot (a_1^2 + b_1^2)}{\omega \cdot [(b_1 p_1 - a_1 q_1) - \omega C \cdot (a_1^2 + b_1^2)]} \quad (\text{П.1.12})$$

Прилог 2 – Генетски алгоритам

Конвенционалне методе оптимизације се могу поделити на директне (неградијентне) и градијентне методе. Неградијентне методе су методе претраге које захтевају стални прорачун вредности објективне функције и проверу физибилитета решења. С обзиром да се не користе изводи објективне функције, конвергенција директних метода је спора и захтева велики број евалуација објективне функције и ограничења. Градијентне методе су брже јер користе информације о првом (методе првог реда) или/и другом изводу објективне функције (методе другог реда). Међутим градијентне методе нису применљиве на недиференцијабилне и дисконтинуалне функције у свом основном облику. Такође, многе конвенционалне методе су погодне за решавање само одређеног типа проблема и захтевају велике модификације самог алгоритма у случају решавања различитих оптимизационих задатака.

Генетски алгоритам (ГА) је први пут представљен у књизи *John Holland*-а 1975. године. Од тада па до данас је ГА доживео експанзију у области оптимизације до те мере да постоје посебни научни часописи, посебне конференције и научни скупови посвећени искључиво примени ГА за решавање оптимизационих проблема из различитих области природних наука. Главни разлог популарности ГА се огледа у једноставности самог алгоритма, широком дијапазону применљивости и могућности паралелног процесирања алгоритма.

ГА је оптимизациона метода претраге која функционише на Дарвиновом принципу природне селекције и природне генетике. Стандардни ГА започиње своју претрагу насумичним скупом решења која су кодирана у бинарни низ бројева. Према аналогiji, скуп решења се назива популација, а свако решење у популацији се назива хромозом. Сваком решењу се приписује једна *fitness* вредност која је у директној вези са вредношћу објективне функције тог решења и квантификује квалитет тог решења у популацији. Након тога, популација решења се модификује применом три основне операције чиме се добија нова популација решења. Три генетичке операције које се врше су:

1. селекција (*selection*)
2. укрштање (*crossover*)
3. мутација (*mutation*)

Након једне примене ових операција и добијања нове популације, каже се да је завршена једна генерација. Генерација у ГА је еквивалентна са итерацијом конвенционалних метода оптимизације. Итеративним понављањем овог поступка се долази до коначне популације решења у којој се најбоље решење сматра оптималним решењем анализираниог проблема.

У суштини, ГА поштује два основна принципа која важе у природи:

1. ако се од родитеља који припадају једној популацији добију потомци који су „изнад просека“, они имају веће шансе да преживе у природи у заснују своје потомке;
2. ако се од родитеља који припадају једној популацији добију потомци који су „испод просека“, они немају шансе да преживе и бивају елиминисани из популације.

Кодирање

Свакорешење у оквиру популације се представља једним хромозомом који се добија кодирањем свих променљивих величина у један низ бинарних бројева. Сви хромозоми у популацији су низови истих дужина, међутим у оквиру једног хромозома не морају све променљиве величине имати исту дужину подниза. Пример једног хромозома који представља једно могуће решење функције са N променљивих величина је приказан на Сл. П.2.1.

$$\underbrace{11010}_{x_1} \quad \underbrace{1001001}_{x_2} \quad \underbrace{010}_{x_3} \quad \dots \quad \underbrace{0010}_{x_N}$$

Сл. П.2.1 Хромозом са N променљивих величина

У даљем тексту ће се са x означавати променљиве величине, а са s њихове кодиране вредности. Ако се нека променљива x_i кодира у променљиву s_i дужине l_i онда је са $s_i = 000\dots 0$ кодирано x_{imin} , а са $s_i = 111\dots 1$ x_{imax} . Све друге вредности променљиве x_i се могу израчунати према изразу:

$$x_i = x_{imin} + \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2^{l_i} - 1} \cdot DV(s_i) \quad (\text{П.2.1})$$

У изразу (П.2.1) $DV(s_i)$ представља декодирану вредност променљиве s_i , тј. променљиву s_i у декадном запису.

Другим речима, променљива x_i се може представити кодираном променљивом s_i која може имати једну одукупно 2^{l_i} вредности између минималне

и максималне вредности променљиве x_i . Број бита (l_i), тј. дужина подниза којим ће се кодирати променљива, зависи од потребне тачности те променљиве величине. Ако је потребна тачност ε_i , тада је потребна дужина кода променљиве x_i :

$$l_i = \log_2 \left(\frac{x_{imax} - x_{imin}}{\varepsilon_i} \right) \quad (\text{П.2.2})$$

Укупна дужина хромозома је збир дужина свих кодираних променљивих:

$$L = \sum_{i=1}^N l_i \cdot$$

Fitness вредност

Сваком хромозому, било да је реч о иницијалном решењу или хромозому наредних генерација, се додељује *fitness* вредност. Ова вредност је у директној вези са вредношћу објективне функције и квантификује квалитет тог решења у популацији. *Fitness* вредност се обично узима да буде једнака вредности објективне функције за у задацима максимизације, односно реципрочној вредности објективне функције у задацима минимизације. Најчешће се користи следећа једначина у задацима минимизације:

$$Fitness = \frac{1}{1 + f(x_1, \dots, x_N)} \quad (\text{П.2.3})$$

У једначини (П.2.3) $f(x_1, \dots, x_N)$ представља објективну функцију.

Селекција

Селекција је обично прва операција ГА над једном популацијом. Суштина селекције је да се од свих решења у оквиру популације бирају она решења над којима ће се даље вршити операција укрштања у циљу добијања нове популације решења. Као што је већ напоменуто, решења која имају већу шансу да формирају своје потомке у новој популацији су решења са бољом *fitness* вредношћу и управо се на овоме базирају принципи селекције. Два су основна алгоритма по којима се може вршити селекција хромозома у популацији:

1. точак рулета (*roulette-wheel*)
2. турнир (*tournament*)

Принцип рада точка рулета је једноставан. Претпоставимо да у оквиру популације постоји M решења. Свако решење заузима један део точка рулета. Колики део ће заузети поједина решења зависи од њихове *fitness* вредности тако

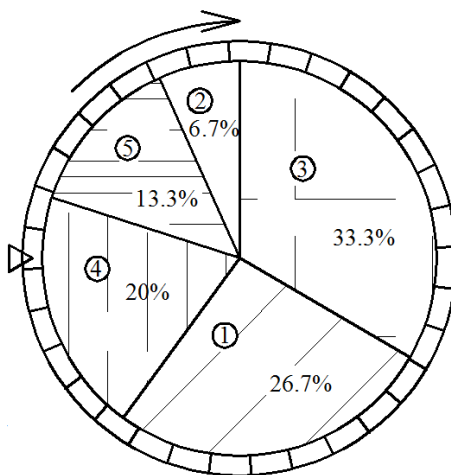
што ће решења са већом *fitness* вредношћу zauzeti већи део површине точка рулета. Тако се практично поставља да је вероватноћа избора решења i :

$$p_i = \frac{Fitness_i}{\sum_{j=1}^M Fitness_j} \quad (\text{П.2.4})$$

Међутим, у случају да је једно решење у популацији доминантно у односу на остала решења могло би се десити да доминантно решење заузима велики део точка рулета што оставља веома малу вероватноћу избора било ког другог решења. Овај проблем се решава рангирањем решења у оквиру популације од најбољег до најгорег. Решењима се додељује ранг од 1 (за најгоре решење) до M (за најбоље решење). Након рангирања се може одредити вероватноћа избора решења у процесу селекције, односно површина точка рулета коју заузимају поједина решења:

$$p_i = \frac{Rang_i}{\sum_{j=1}^M j} \quad (\text{П.2.5})$$

На Сл. П.2.2 је приказан изглед точка рулета за случај популације од 5 хромозома.



Сл. П.2.2 Точак рулета након рангирања решења

Имајући у виду да се величина популације одржава константном, потребно је точак рулета „завртети“ M пута како би се изабрало M решења.

Турнир је такође принцип селекције који се веома често користи због своје једноставности. Садржи се у насумичном избору два решења од којих у групу за укрштање пролази оно решење са бољом *fitness* вредношћу. Овакав начин селекције је потпуно стохастички и њиме се не фаворизују добра решења што за последицу има спорију конвергенцију.

Укрштање

Укрштање је операција која се спроводи над паровима хромозома који су изабрани у процесу селекције. Сврха укрштања је да се претражи простор око претпостављених решења у циљу добијања бољих решења која ће се појавити у наредној популацији. Укрштање се може изводити на више начина, али је принцип исти без обзира на начин укрштања. Најједноставније укрштање је укрштање у једној тачки. Оно се спроводи тако што се у пару хромозома произвољно одабере место на једнаком растојању од краја хромозома на којем се ти хромозоми поделе на два дела. Затим се замене делови хромозома са десне стране места укрштања и формирају се два нова хромозома. На следећој слици је приказан принцип укрштања у једној тачки:

$$\begin{array}{cc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{cc|ccc} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Сл. П2.3 Принцип укрштања у једној тачки

Укрштање у две тачке се изводи на сличан начин. Произвољно се одреде два места укрштања, а средишњи делови хромозома се међусобно замене. Иако ова операција делује прилично насумично, чињеница да се на овај начин може претражити максимално $2(L-1)$ решења од укупно 2^L могућих решења говори да то није тако. Такође се не мора водити рачуна о томе да ли ће се операцијом укрштања добити решења која су боља или лошија, јер ће боља решења бити изабрана у наредном поступку селекције, док ће лошија решења бити елиминисана.

Потребно је напоменути да не учествују сви селектовани хромозоми у операцији укрштања. Дефинише се вероватноћа укрштања p_c тако да у процесу укрштања учествују $100 p_c\%$ селектованих хромозома, а остали хромозоми се директно преписују у наредну популацију.

Мутација

Мутација је операција која се изводи са малом вероватноћом p_m . За разлику од укрштања у коме се операција врши над два хромозома, мутација се врши над једним хромозомом. Суштина је да се неки бит у хромозому промени са 0 на 1 (или обрнуто). Принцип мутације је приказан на Сл. П.2.4.

$$00000 \Rightarrow 00010$$

Сл. П2.4 Принцип мутације

Мутација је корисна операција када сви хромозоми у популацији имају исти бит на истом месту. Тада се укрштањем тај бит не може променити. Мутација омогућава промену тог бита и евентуално побољшање популације. Ако се, међутим, мутацијом добије лошији хромозом, он ће бити елиминисан у процесу селекције.

Након што су селекција, укрштање и мутација извршени над једном популацијом, завршена је једна генерација и формирана је нова популација која улази у наредну генерацију.

Уважавање ограничења

Досадашње разматрање се односило на решавање задатака оптимизације без ограничења, односно само са ограничењима променљивих између минималне и максималне вредности. Пошто већина реалних проблема оптимизације спада у групу оптимизационих проблема са ограничењима, неопходно је у претходни алгоритам унети неке измене да би се уважила сва ограничења која морају бити задовољена.

Једна од најчешће примењиваних метода уважавања ограничења у ГА јесте метода пенализације. Суштина ове методе је у томе да решења која не задовољавају ограничења, буду решења која ће се елиминисати у наредној генерацији. То се постиже на тај начин што се модификује вредност објективне функције решења која не задовољавају ограничења тако да та решења имају малу вредност *fitness*-а и бивају елиминисана у процесу репродукције. Другим речима, ако је задатак минимизације, вредност објективне функције ће се повећавати, а ако је задатак максимизације, вредност објективне функције ће се смањивати за решења која не задовољавају ограничења.

Нека су дата ограничења:

$$g_j(\mathbf{x}) \geq b_j, j = 1, \dots, k \quad (\text{П.2.6})$$

$$h_i(\mathbf{x}) = c_i, i = 1, \dots, l \quad (\text{П.2.7})$$

Ако за неко решење $\mathbf{x}=[x_1 \dots x_n]$ ограничења нису задовољена, онда се вредност пенализације може одредити као:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^k \left\langle \frac{g_j(\mathbf{x})}{b_j} - 1 \right\rangle + \sum_{i=1}^l \left| \frac{h_i(\mathbf{x})}{c_i} - 1 \right| \quad (\text{П.2.8})$$

Небитно је да ли су ограничења типа једнакости нарушена у позитивну или негативну страну. Због тога се користи апсолутна вредност у изразу (П.2.8). Заграда у првој суми у изразу (П.2.8) представља апсолутну вредност у случају да је вредност у загради негативна, а ако је вредност у загради позитивна онда се поставља на 0 јер у том случају ограничење није нарушено него само није активно. Када се одреди фактор пенализације P за решење \mathbf{x} , онда се еквивалентна објективна функција може представити следећим изразом:

$$F(\mathbf{x}) = \begin{cases} f(\mathbf{x}), & \text{ако је } \mathbf{x} \text{ у допуштеној области} \\ f_{\max} + P(\mathbf{x}), & \text{ако је } \mathbf{x} \text{ ван допуштене области} \end{cases}$$

f_{\max} - најлошија вредност објективне функције у популацији (П.2.9)

Јасно је да је израз (П.2.9) написан за случај оптимизационих задатака минимизације. Ако је у питању задатак максимизације еквивалентна објективна функција је:

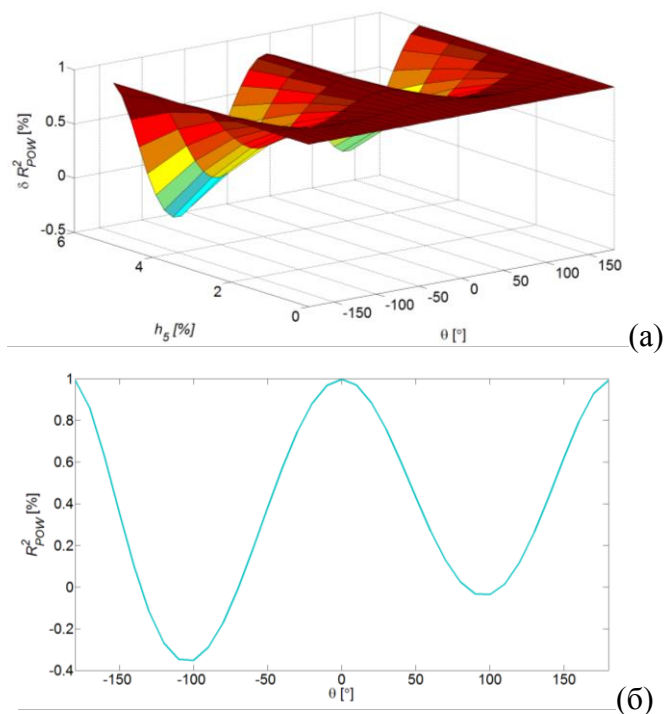
$$F(\mathbf{x}) = \begin{cases} f(\mathbf{x}), & \text{ако је } \mathbf{x} \text{ у допуштеној области} \\ f_{\min} - P(\mathbf{x}), & \text{ако је } \mathbf{x} \text{ ван допуштене области} \end{cases}$$

f_{\min} - најлошија вредност објективне функције у популацији (П.2.10)

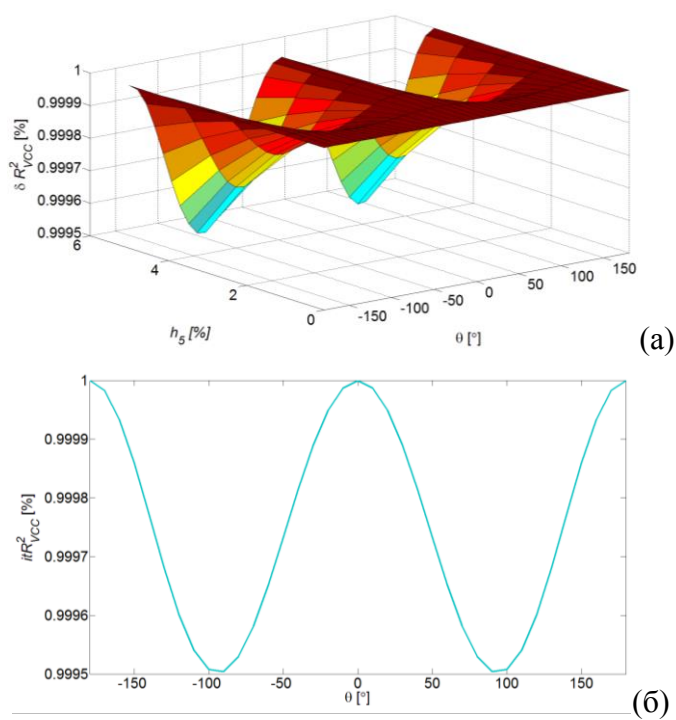
С обзиром да се сва ограничења након једноставних модификација могу представити као у изразу (П.2.7), предходни принцип уважавања ограничења је универзалан.

Јасно је да ће у процесу репродукције решења која се налазе ван допуштене области бити елиминисана због мале вредности *fitness*-а (утолико је мања вредност *fitness*-а уколико је одступање од дозвољене области веће).

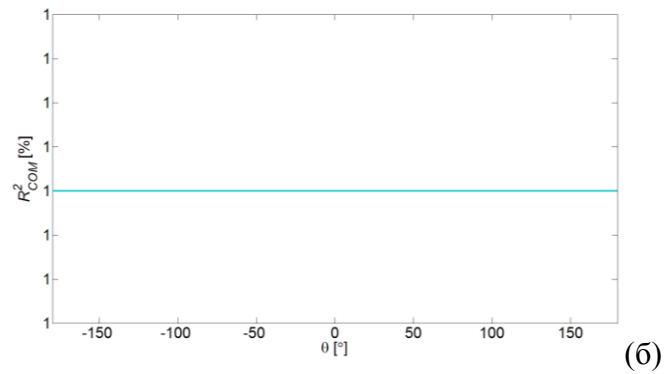
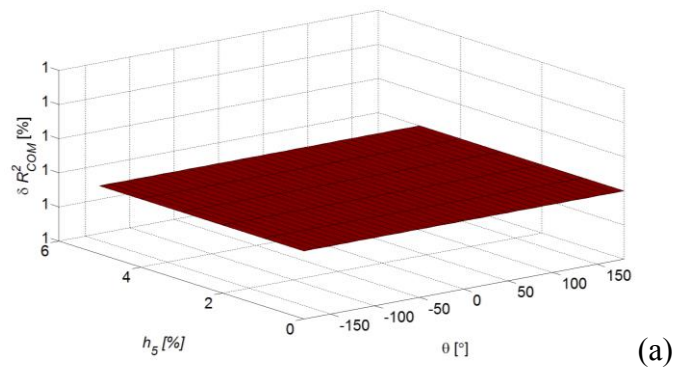
Прилог 3 – Утицај 5. и 7. хармоника напона на грешке метода за мониторинг
МОП-а



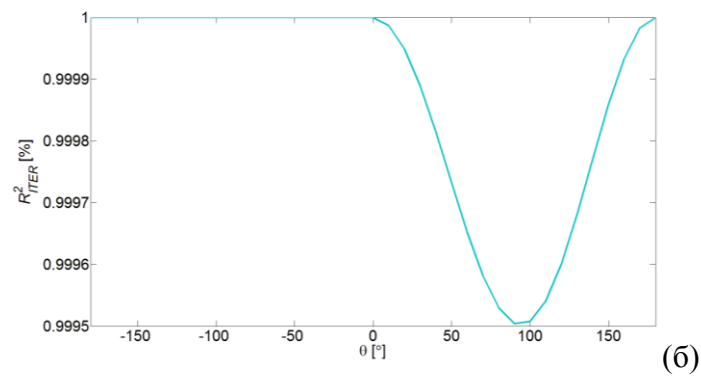
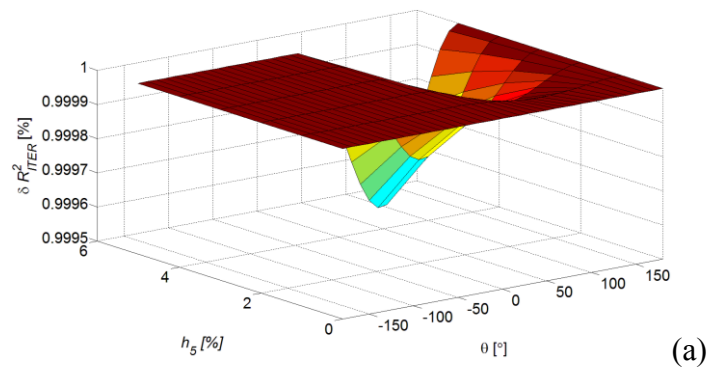
Сл. ПЗ.0.1 Утицај 5. хармоника напона на грешку POW методе (R^2)



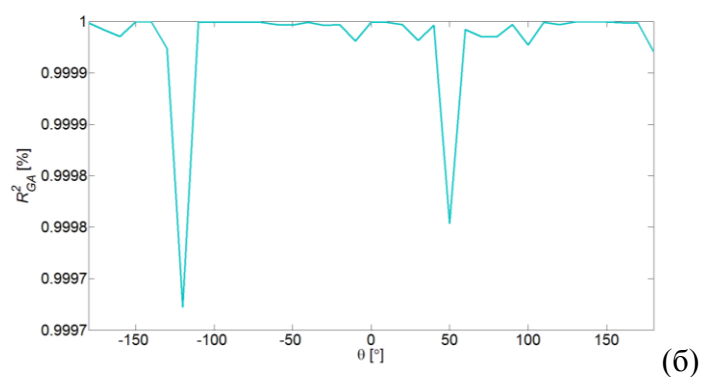
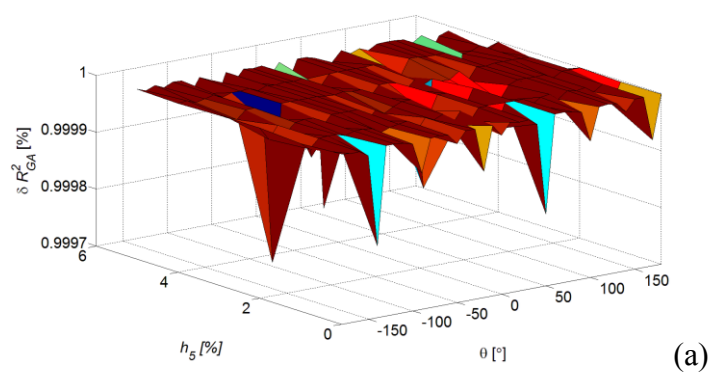
Сл. ПЗ.0.2 Утицај 5. хармоника напона на грешку VCC методе (R^2)



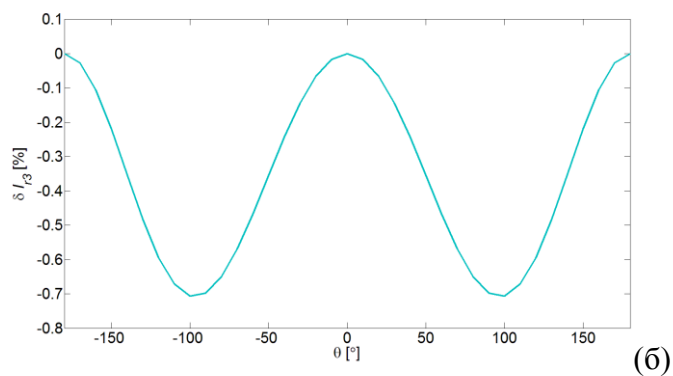
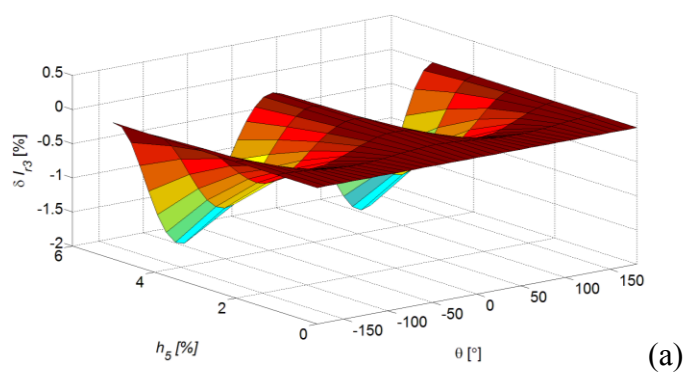
Сл. ПЗ.0.3 Утицај 5. хармоника напона на грешку *COM* методе (R^2)



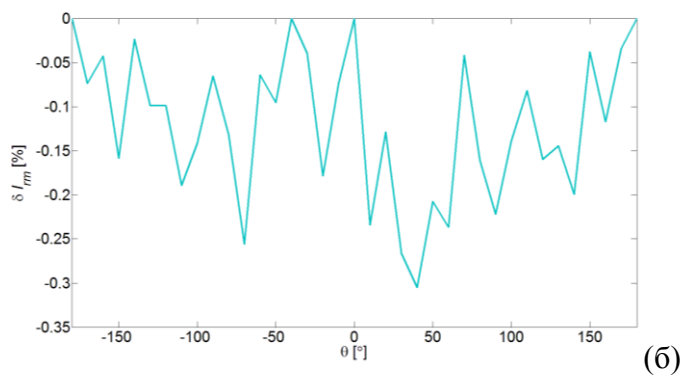
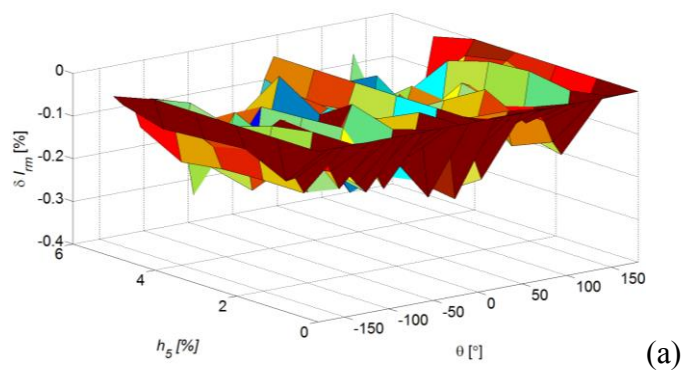
Сл. ПЗ.0.4 Утицај 5. хармоника напона на грешку *ITER* методе (R^2)



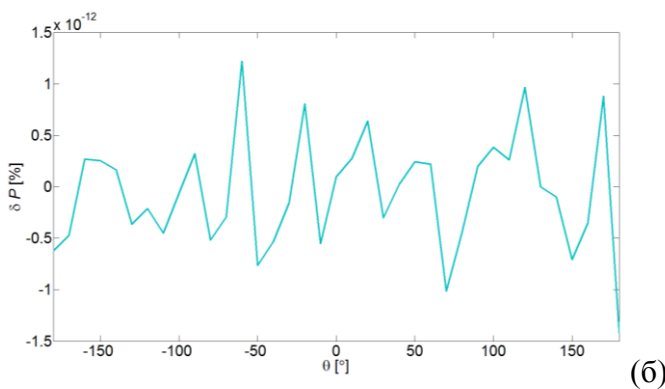
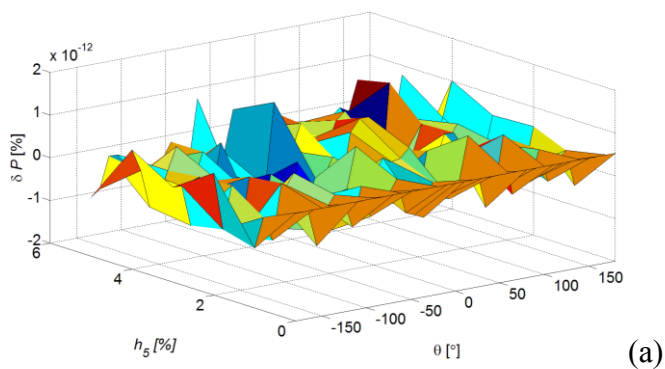
Сл. ПЗ.0.5 Утицај 5. хармоника напона на грешку GA методе (R^2)



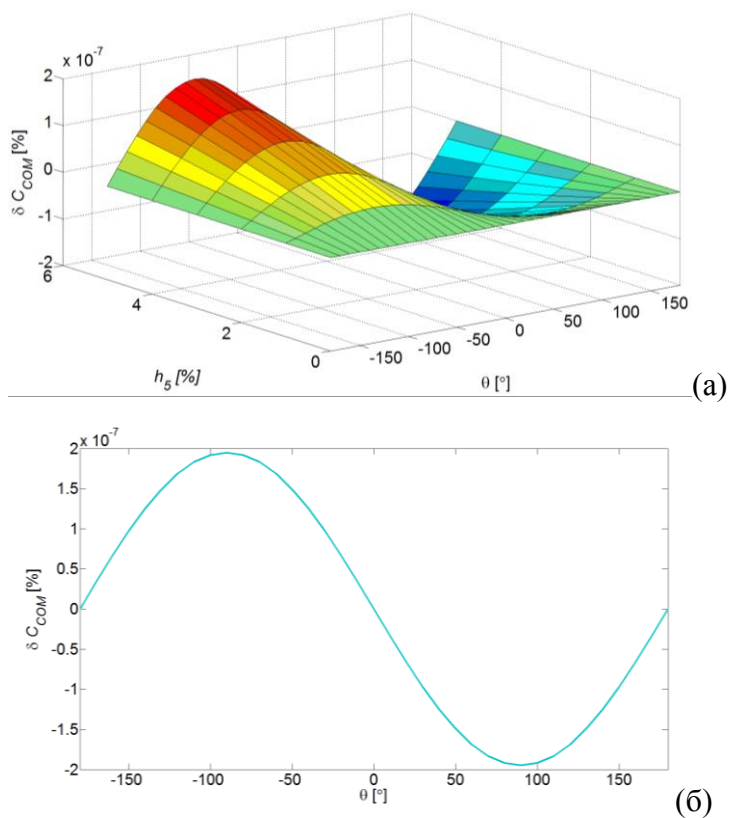
Сл. ПЗ.0.6 Утицај 5. хармоника напона на грешку $HARM$ методе



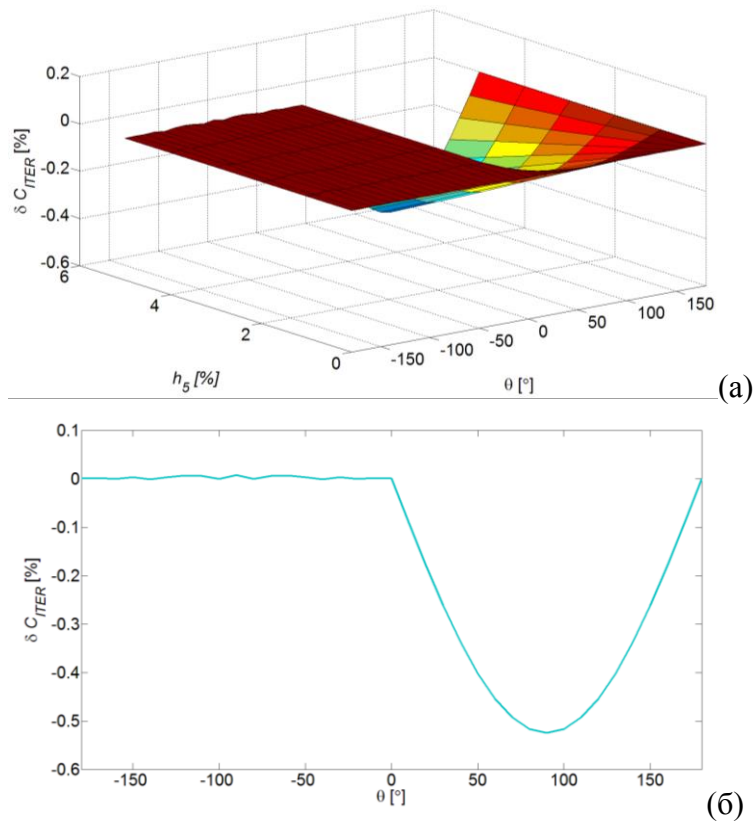
Сл. ПЗ.0.7 Утицај 5. хармоника напона на грешку *DIR* методе



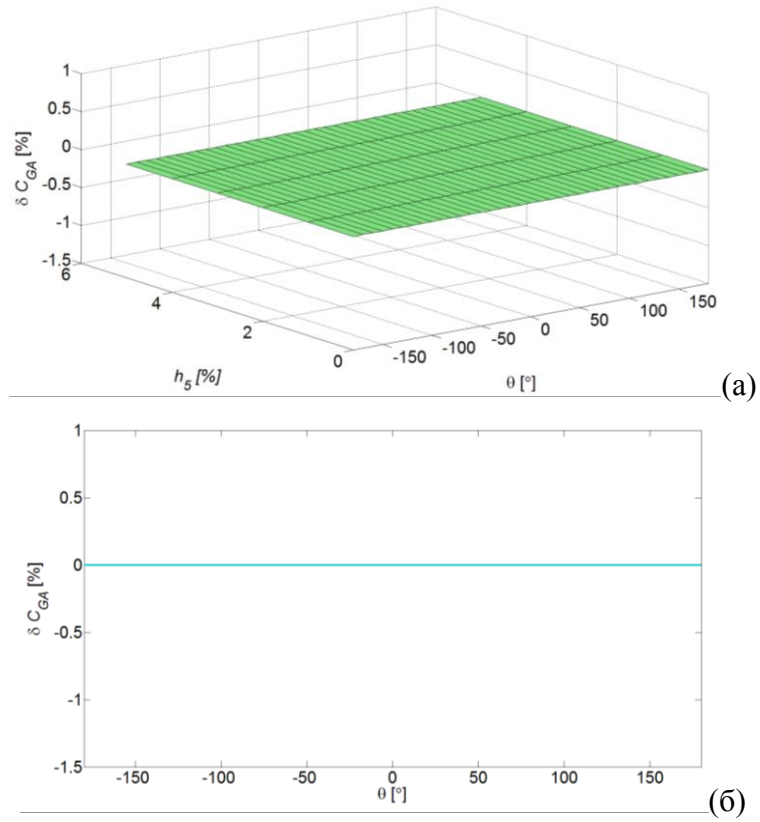
Сл. ПЗ.0.8 Утицај 5. хармоника напона на грешку *P* методе



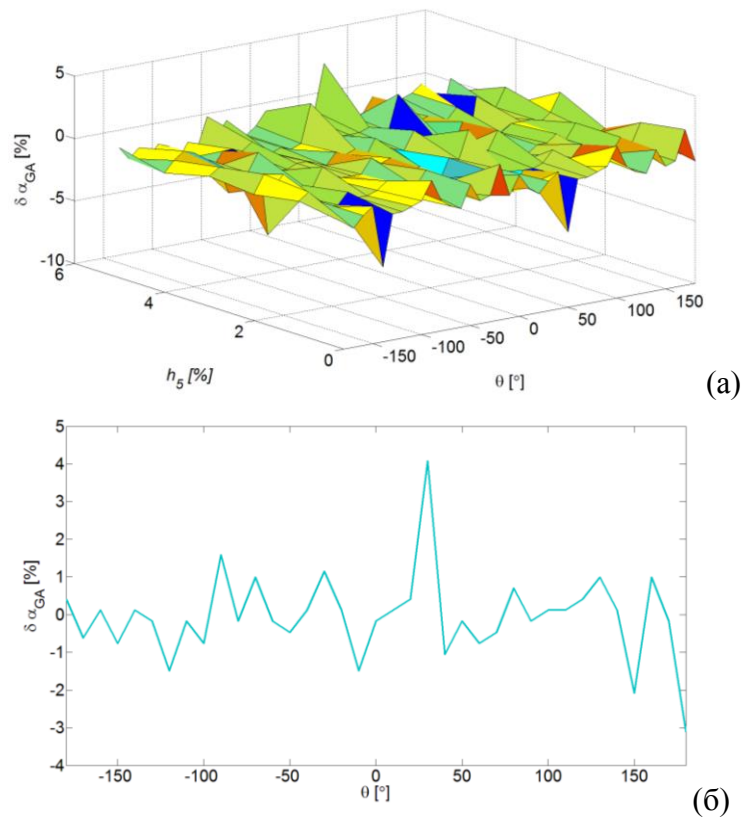
Сл. ПЗ.0.9 Утицај 5. хармоника напона на грешку *COM* методе (коэффициент *C*)



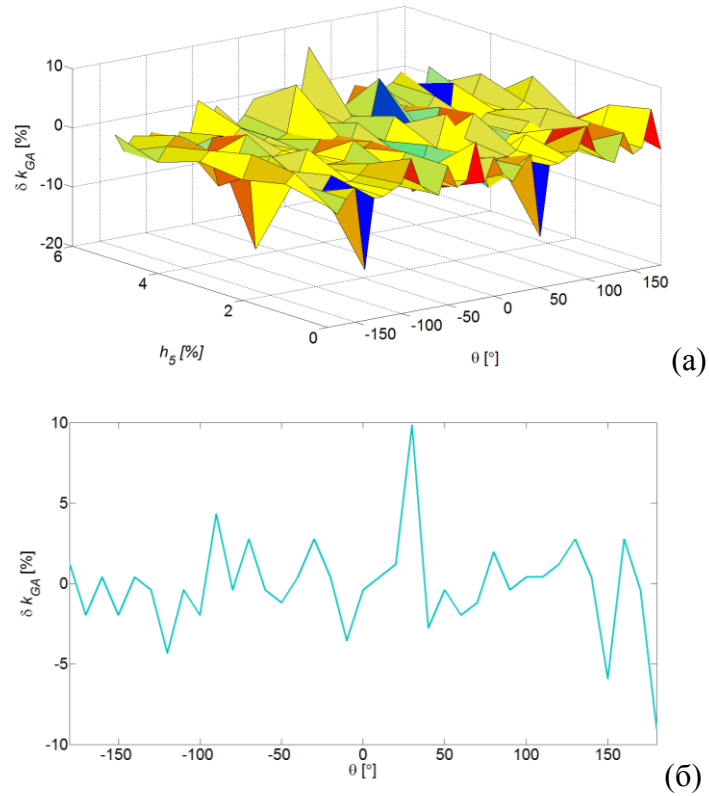
Сл. ПЗ.0.10 Утицај 5. хармоника напона на грешку *ITER* методе (коэффициент *C*)



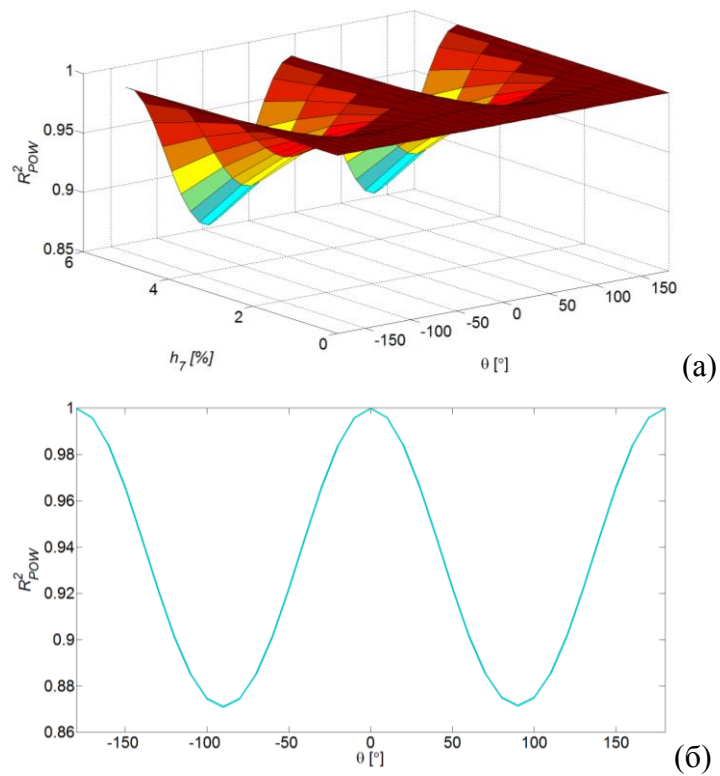
Сл. ПЗ.0.11 Утицај 5. хармоника напона на грешку GA методе (капацитивност C)



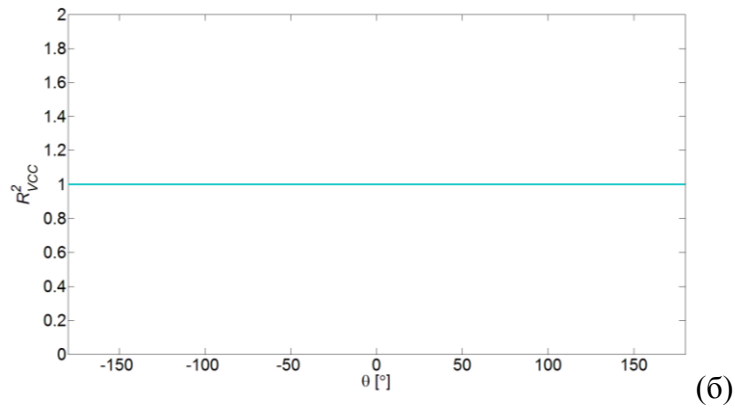
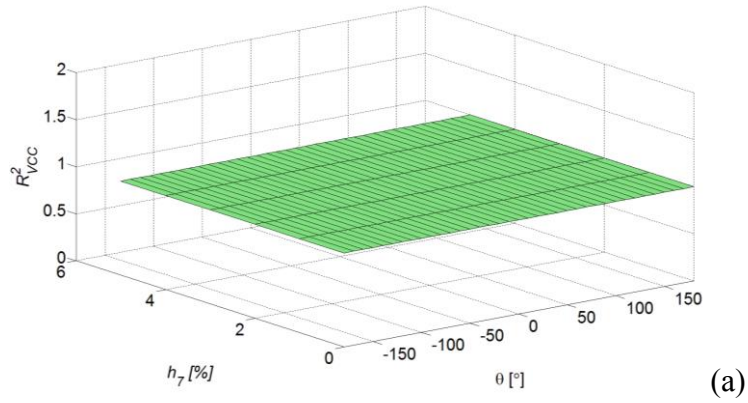
Сл. ПЗ.0.12 Утицај 5. хармоника напона на грешку GA методе (кофицијента)



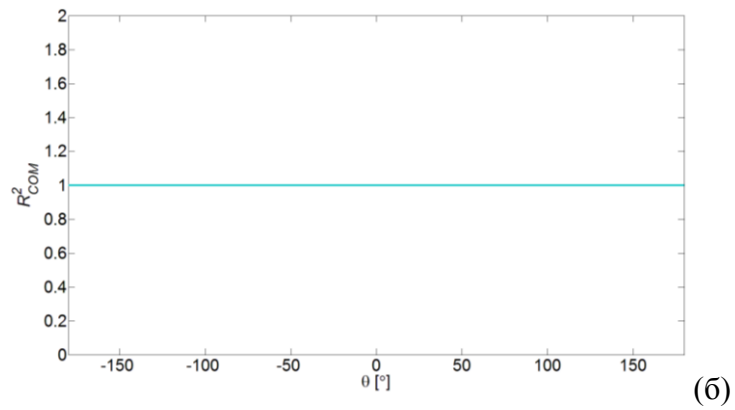
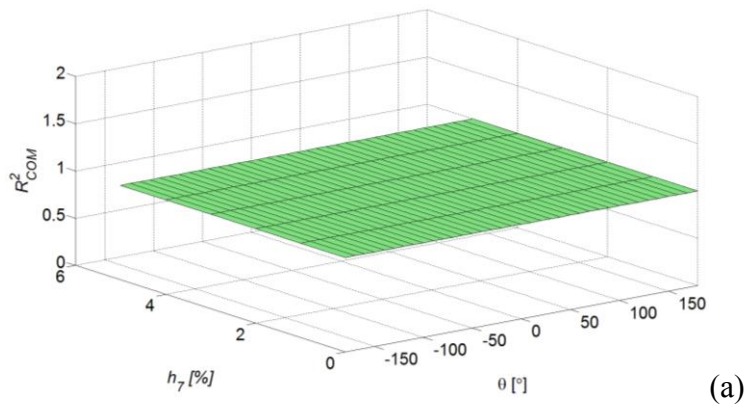
Сл. ПЗ.0.13 Утицај 5. хармоника напона на грешку *GA* методе (коэффицијент *k*)



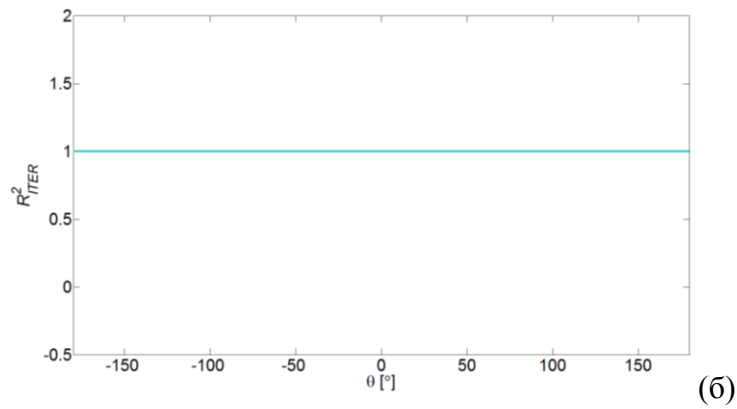
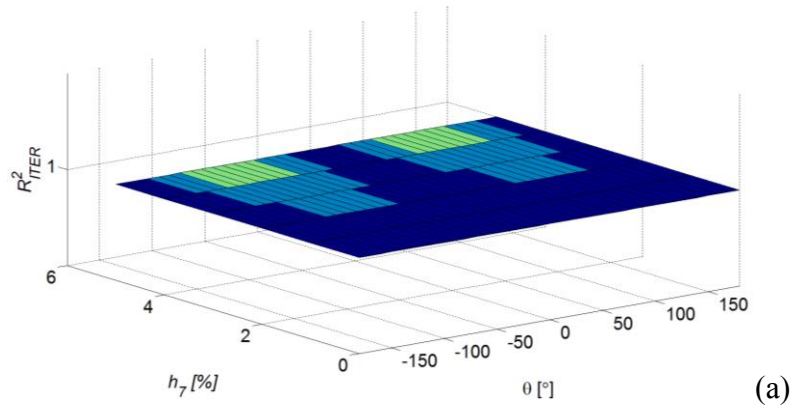
Сл. ПЗ.0.14 Утицај 7. хармоника напона на грешку *POW* методе (R^2)



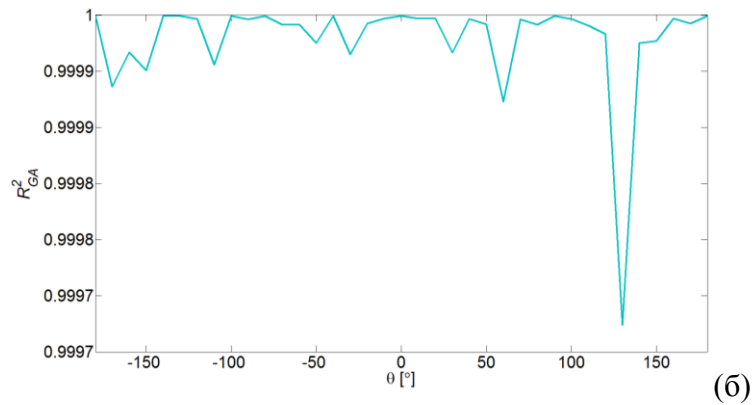
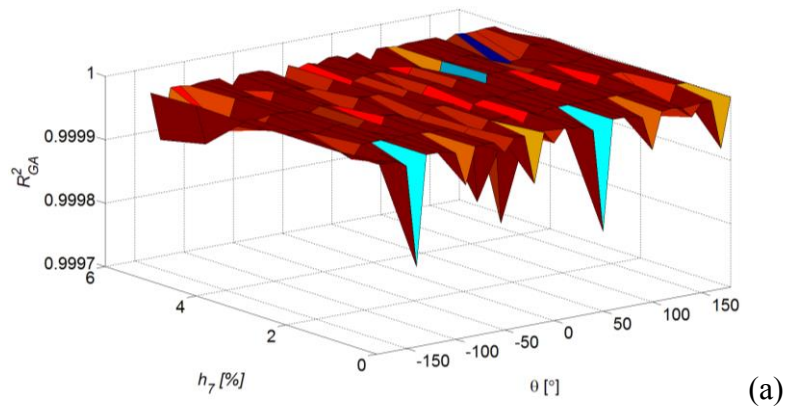
Сл. ПЗ.0.15 Утицај 7. хармоника напона на грешку VCC методе (R^2)



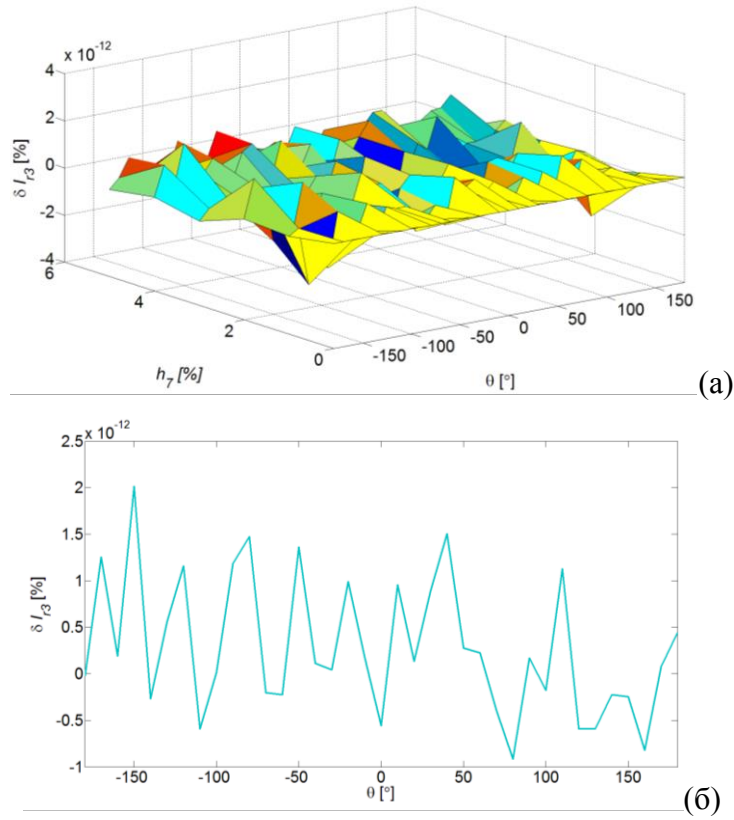
Сл. ПЗ.0.16 Утицај 7. хармоника напона на грешку COM методе (R^2)



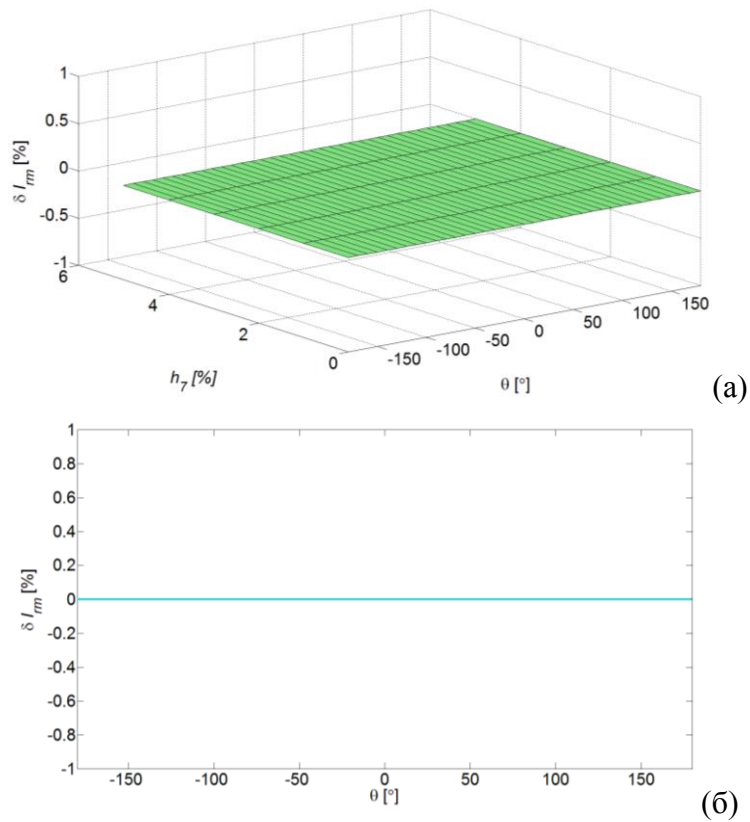
Сл. ПЗ.0.17 Утицај 7. хармоника напона на грешку *ITER* методе (R^2)



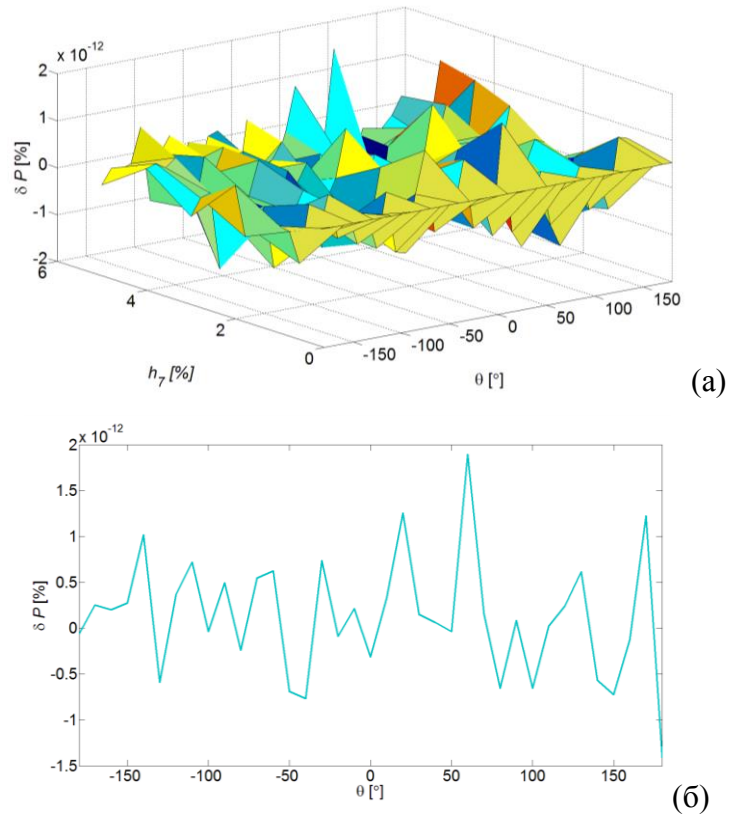
Сл. ПЗ.0.18 Утицај 7. хармоника напона на грешку *GA* методе (R^2)



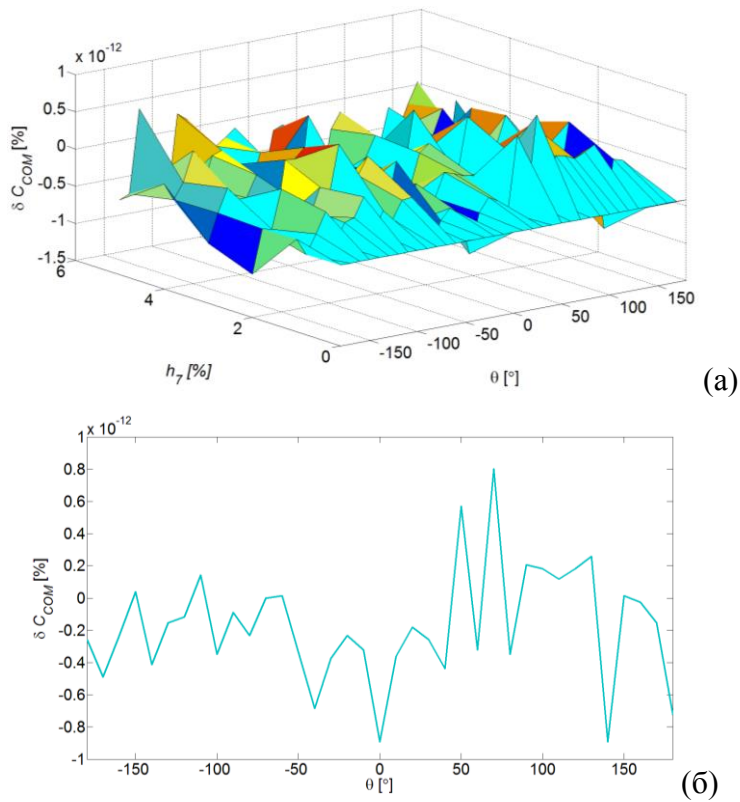
Сл. ПЗ.0.19 Утицај 7. хармоника напона на грешку *HARM* методе



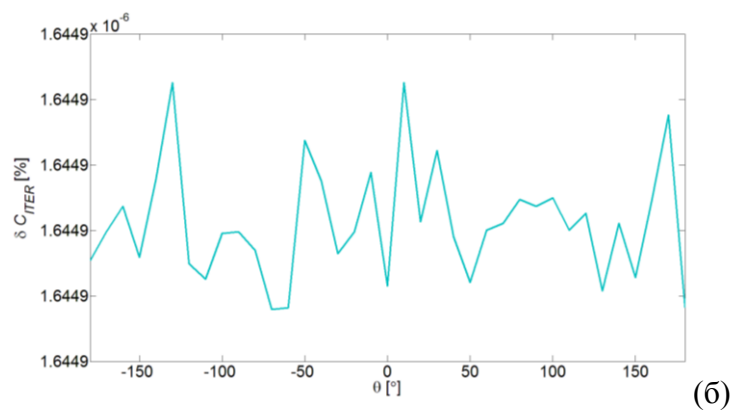
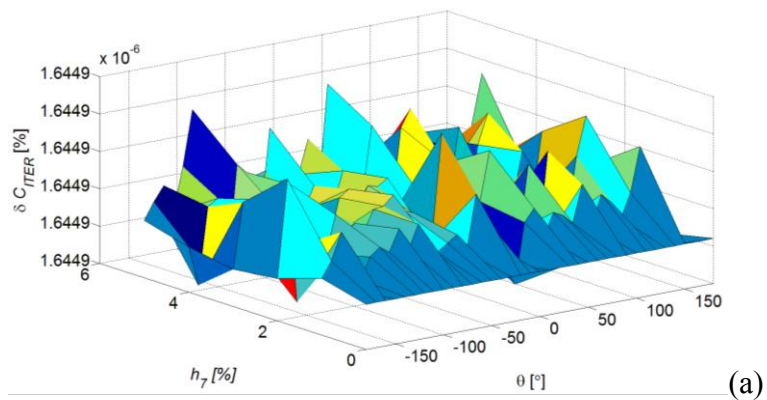
Сл. ПЗ.0.20 Утицај 7. хармоника напона на грешку *DIR* методе



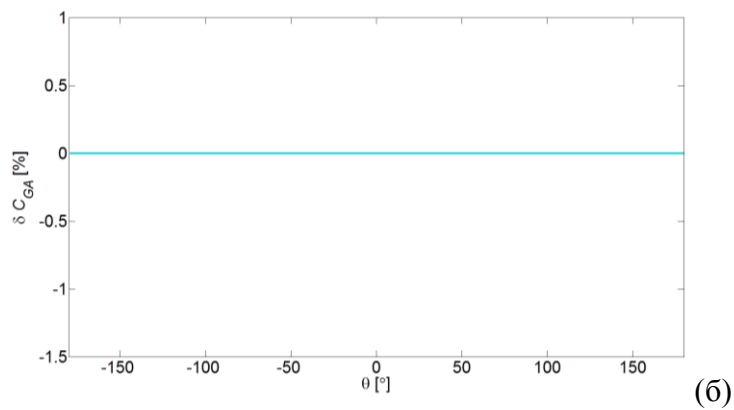
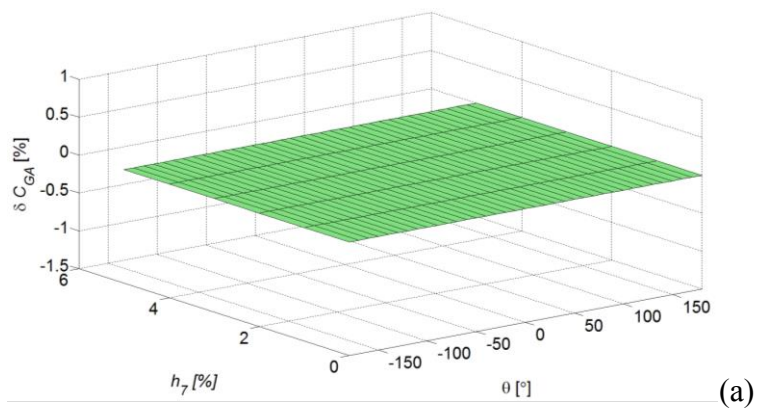
Сл. ПЗ.0.21 Утицај 7. хармоника напона на грешку P методе



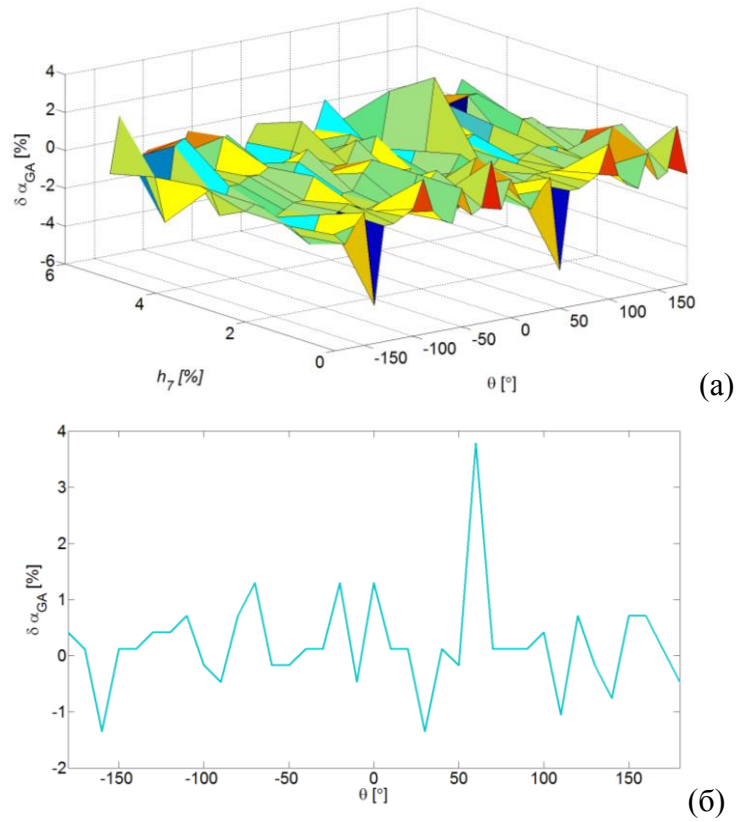
Сл. ПЗ.0.22 Утицај 7. хармоника напона на грешку SOM методе



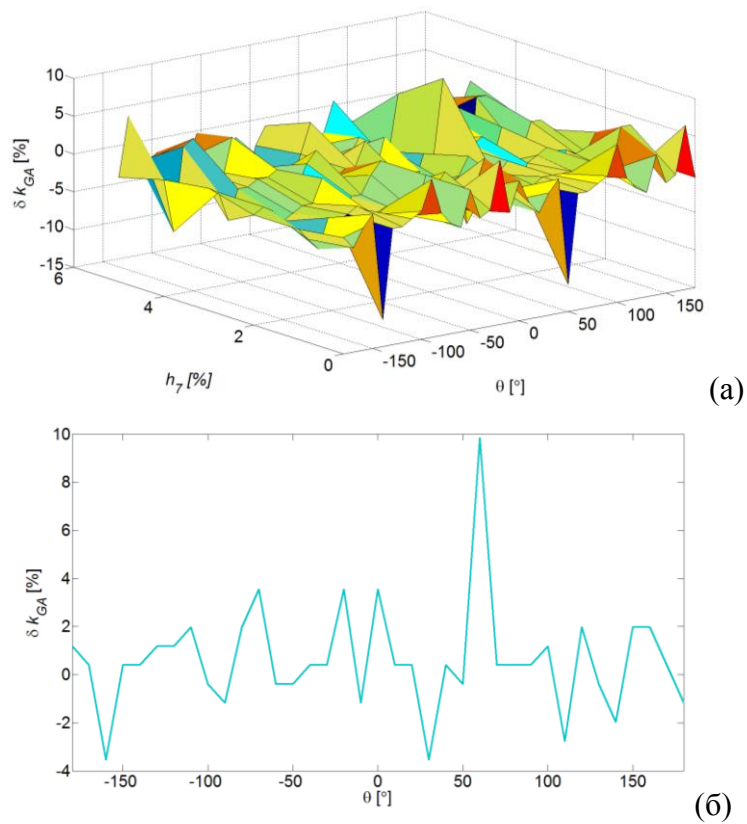
Сл. ПЗ.0.23 Утицај 7. хармоника напона на грешку *ITER* методе



Сл. ПЗ.0.24 Утицај 7. хармоника напона на грешку *GA* методе

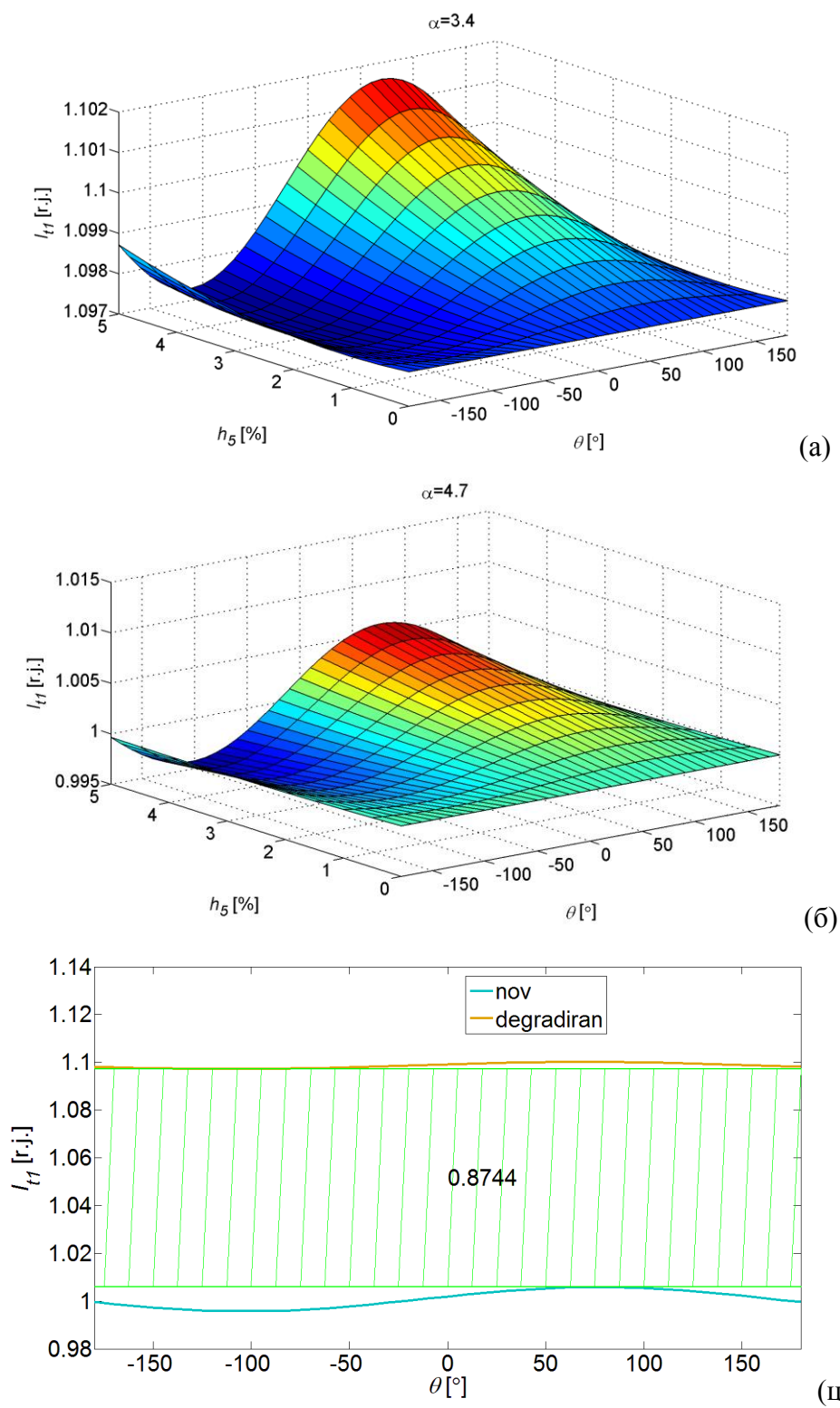


Сл. ПЗ.0.25 Утицај 7. хармоника напона на грешку GA методе

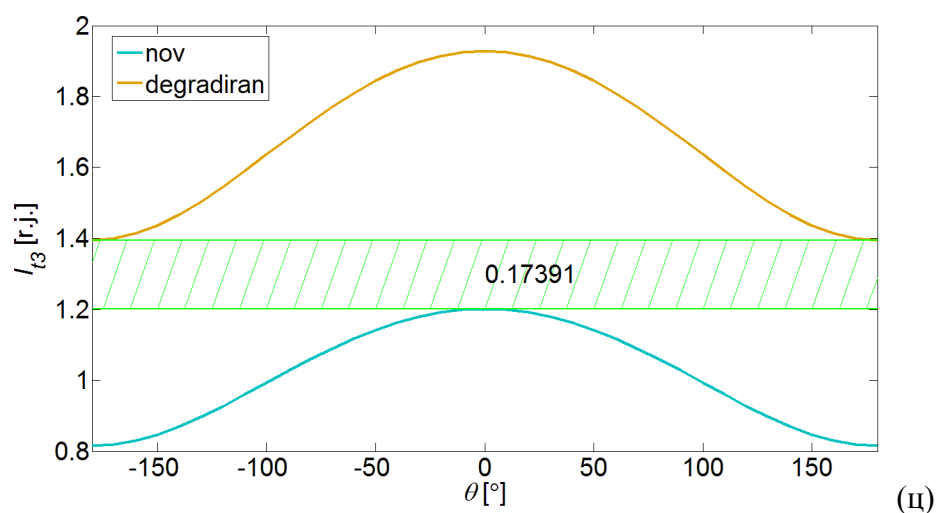
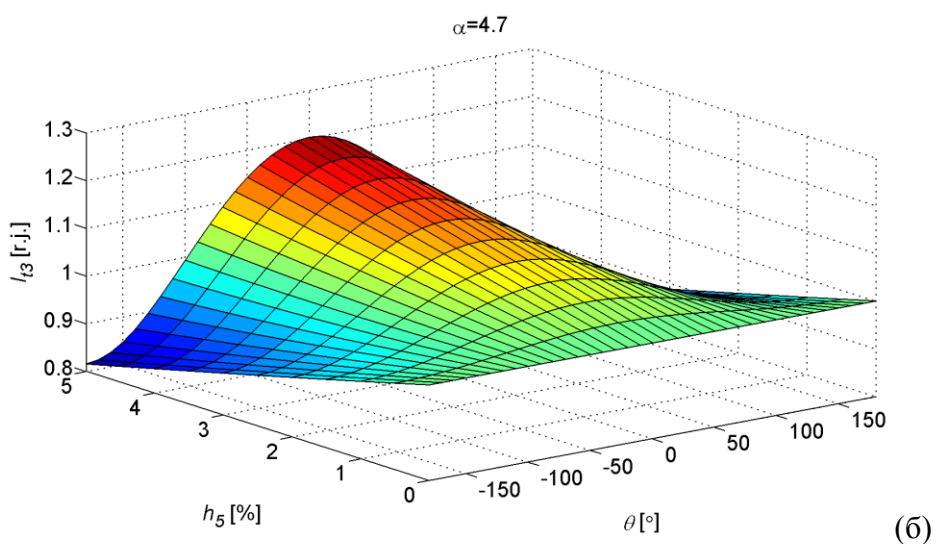
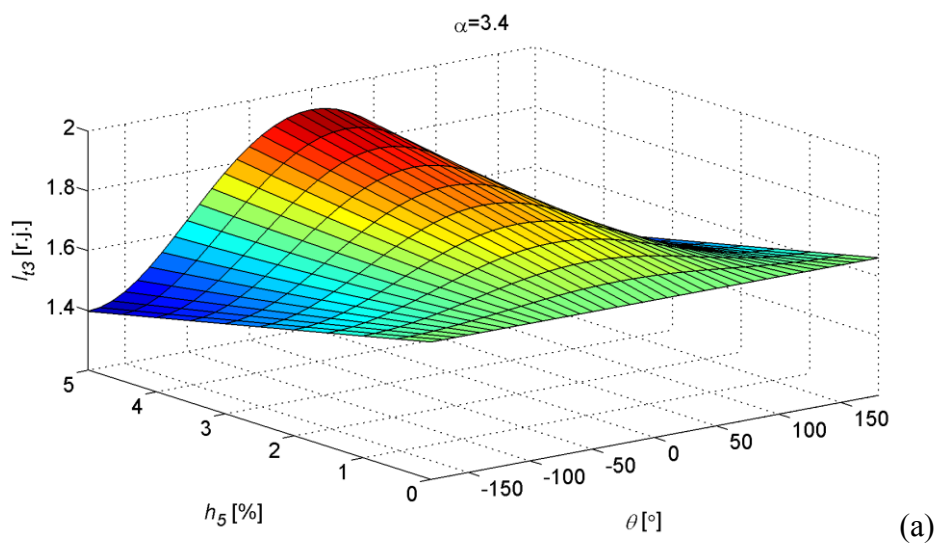


Сл. ПЗ.0.26 Утицај 7. хармоника напона на грешку GA методе (коэф. k)

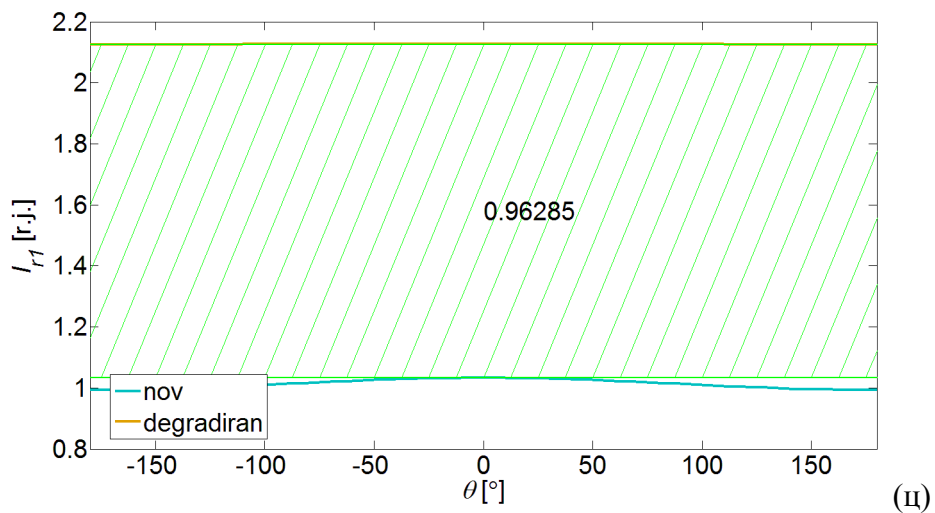
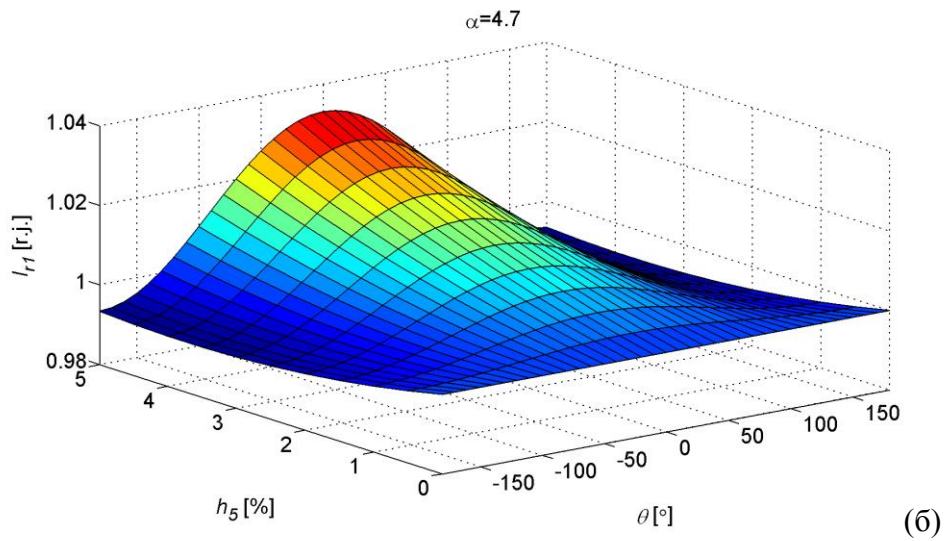
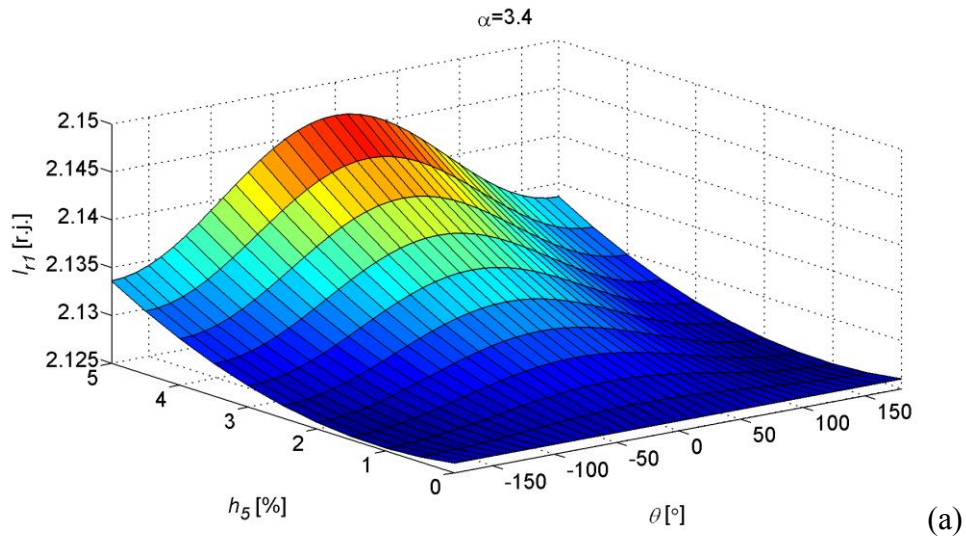
Прилог 4 – Утицај 5. и 7. хармоника напона на показатеље стања МОП-а



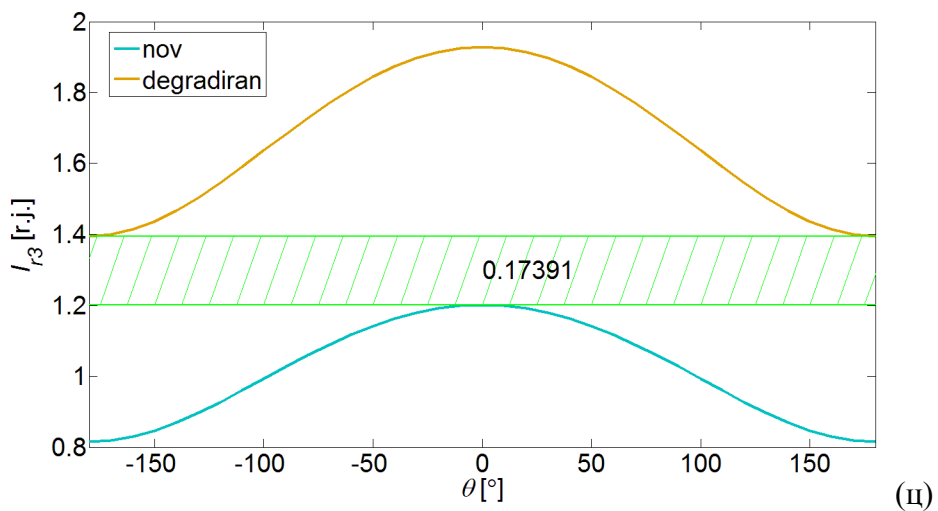
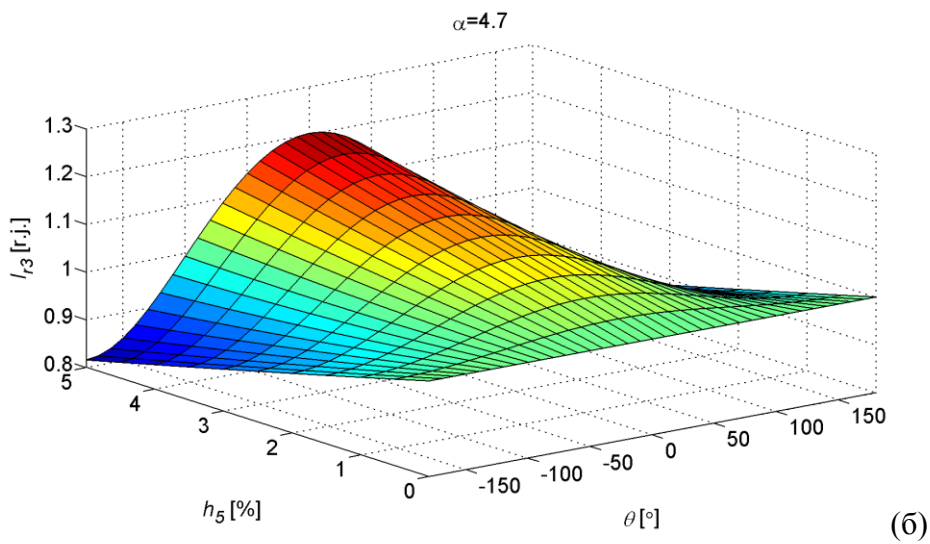
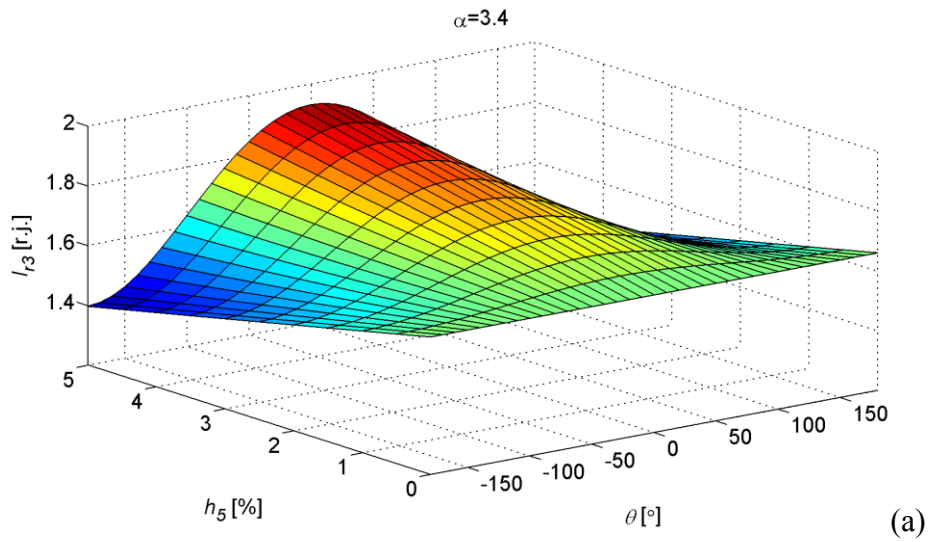
Сл. П4.0.1 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)



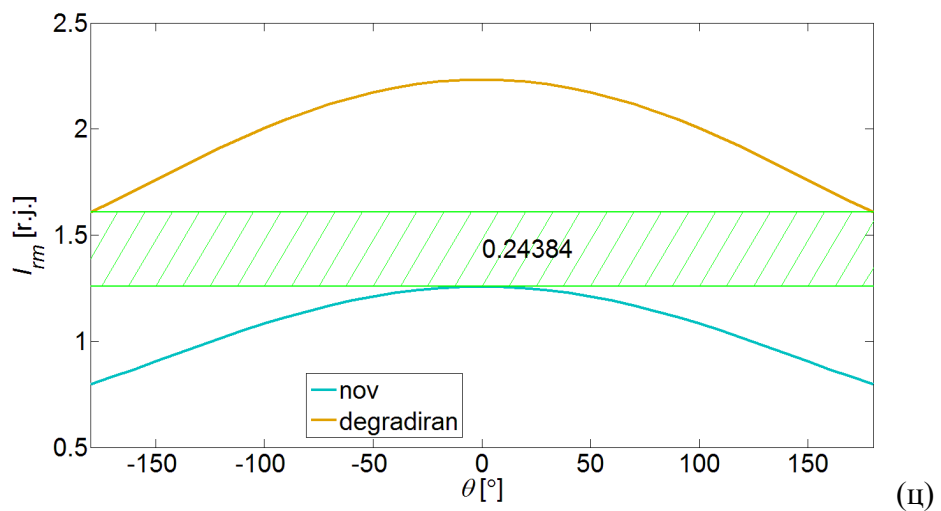
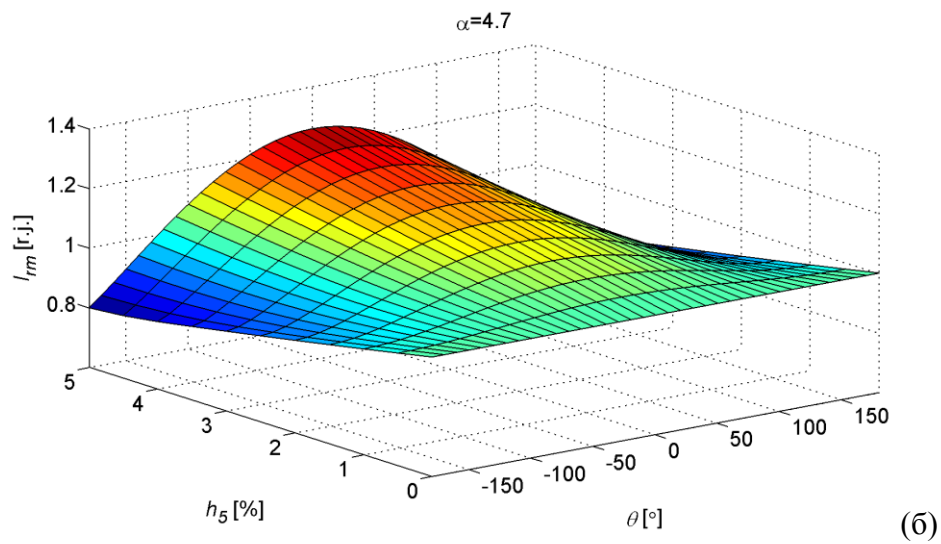
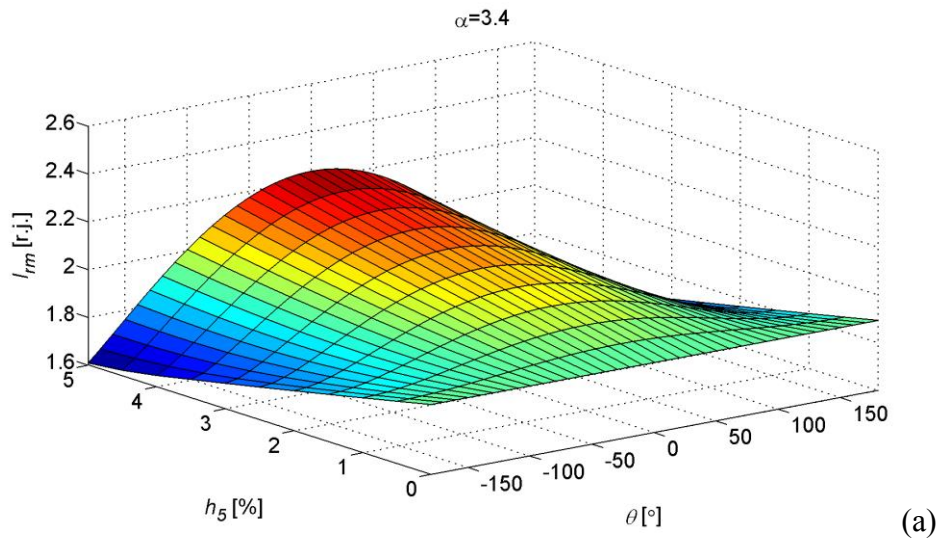
Сл. П4.0.2 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградирани (а) и нови (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



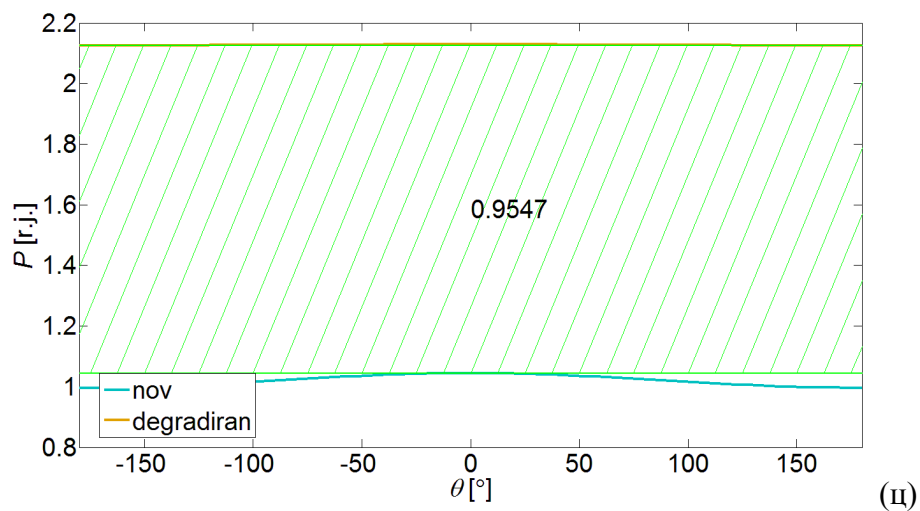
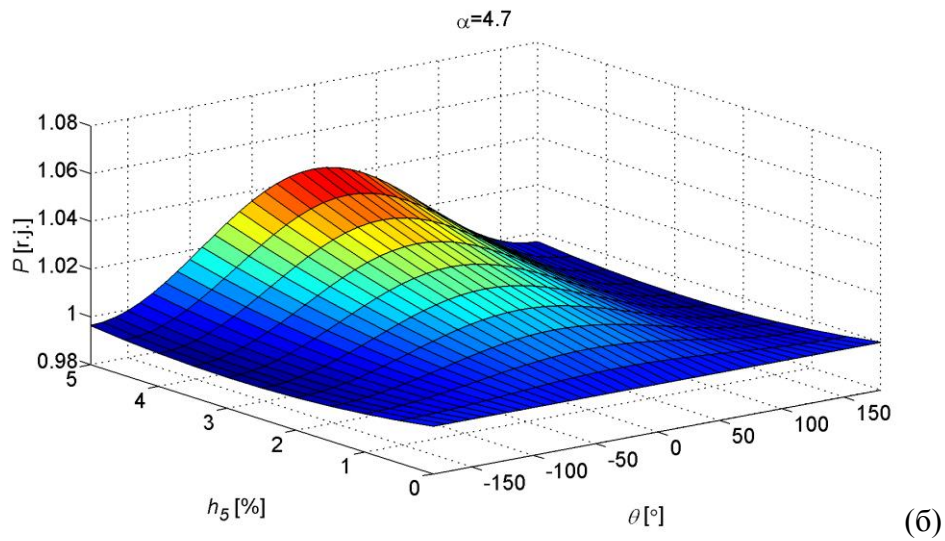
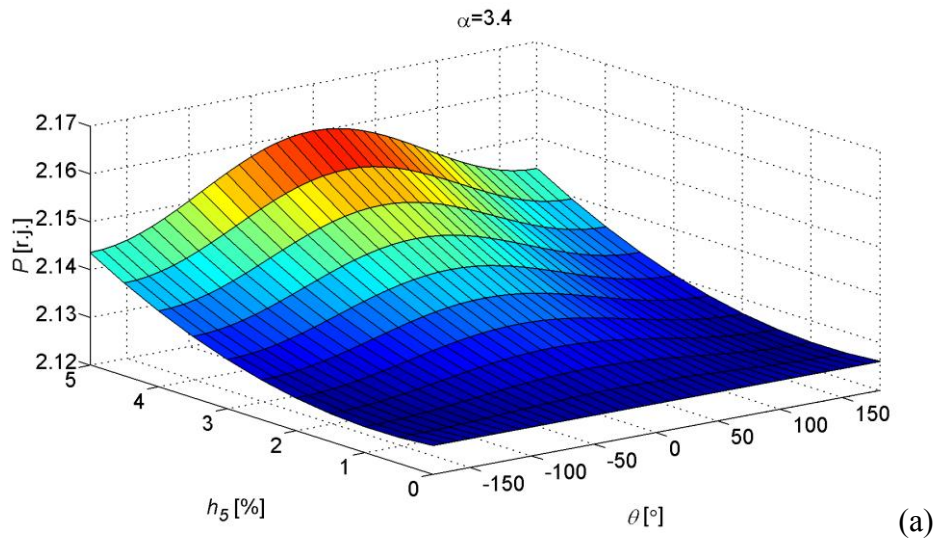
Сл. П4.0.3 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



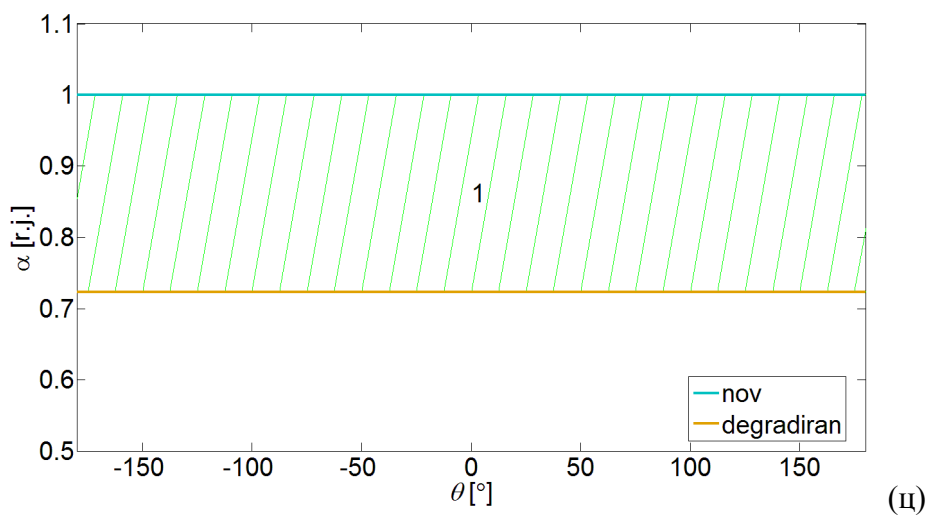
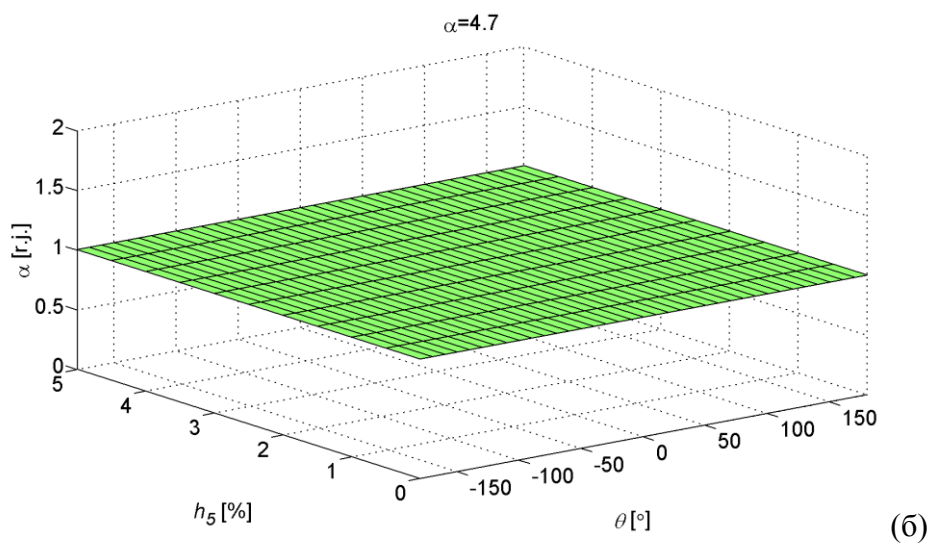
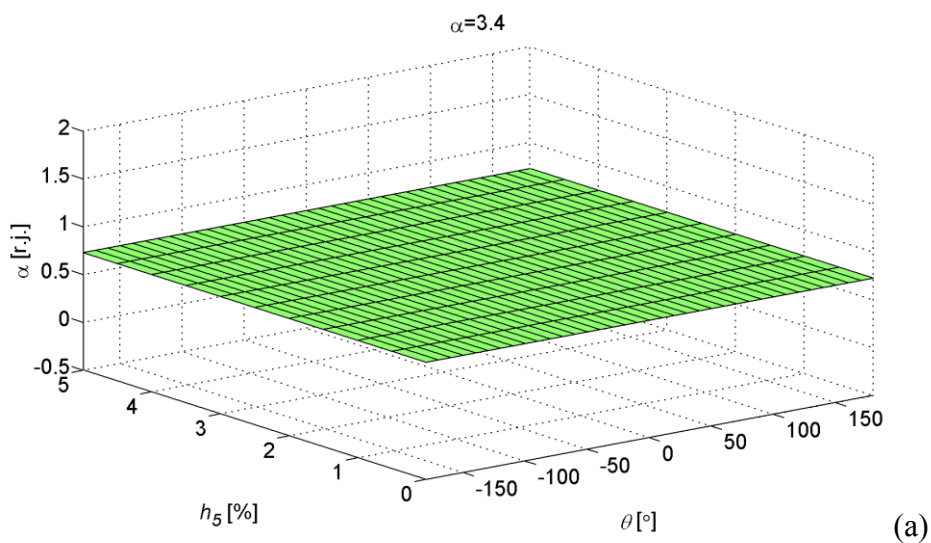
Сл. П4.0.4 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



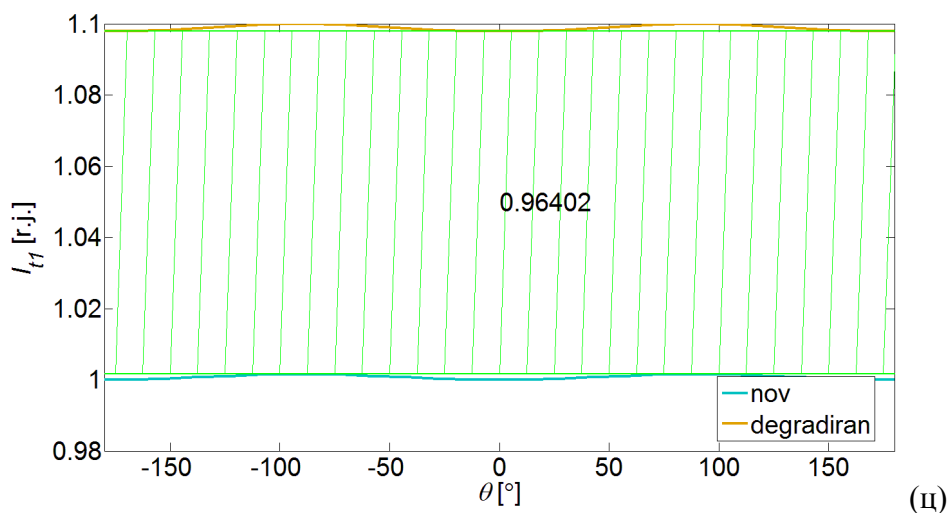
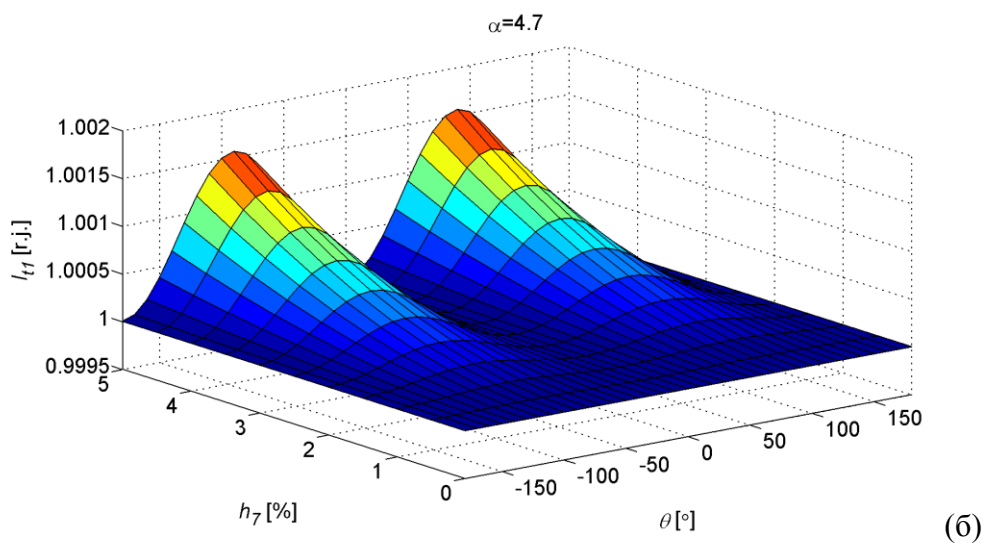
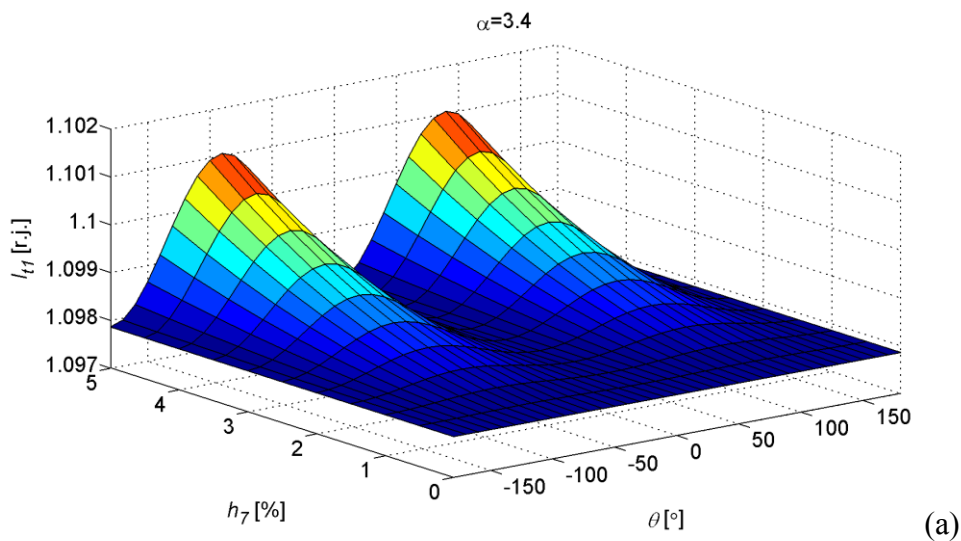
Сл. П4.0.5 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



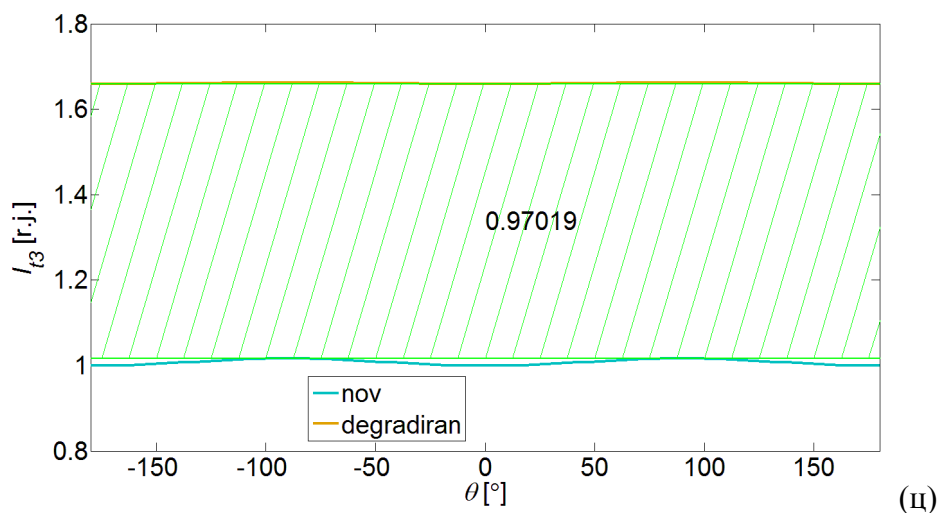
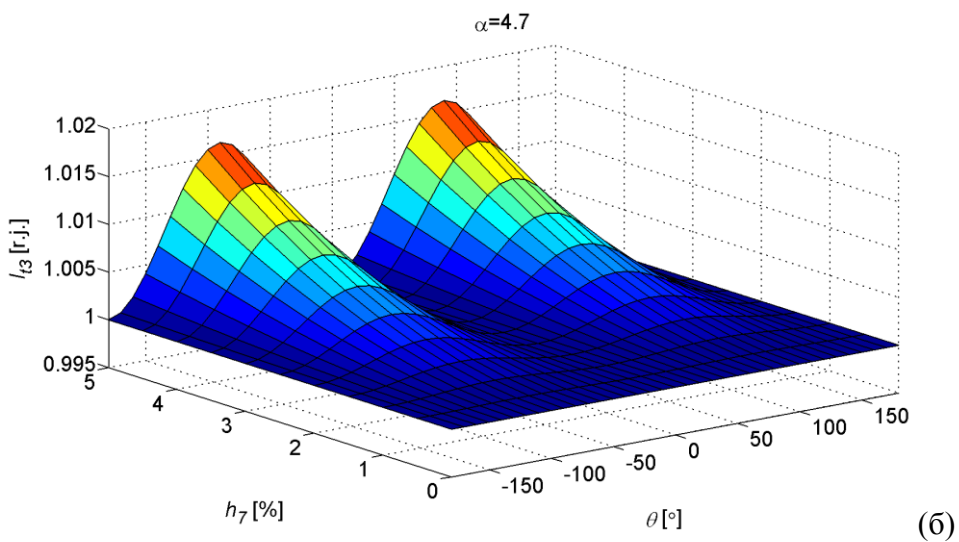
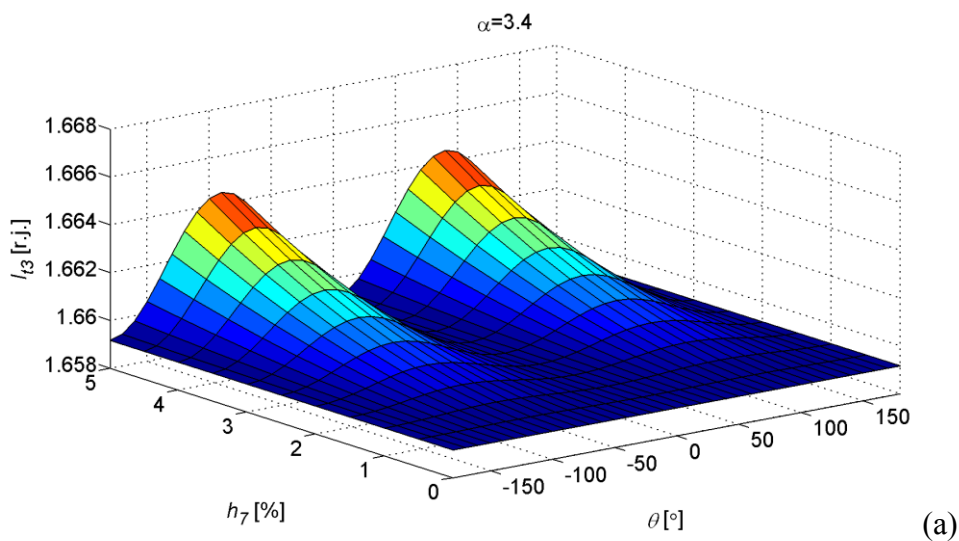
Сл. П4.0.6 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



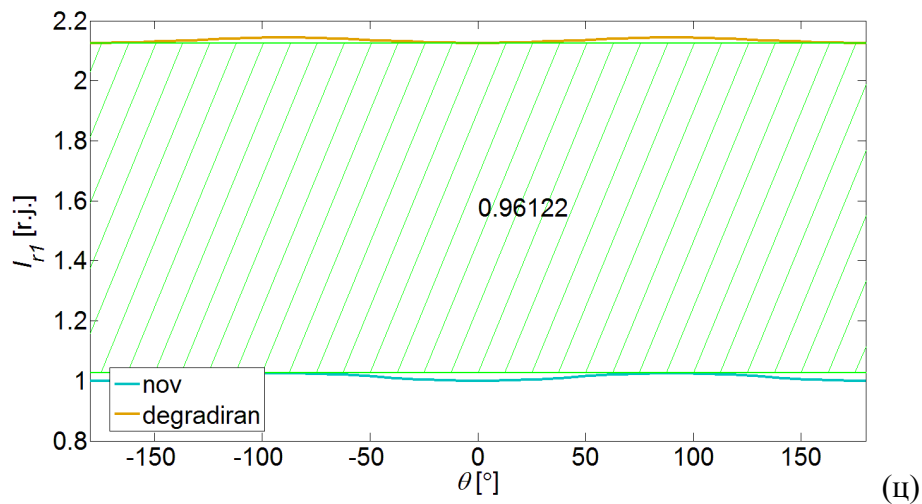
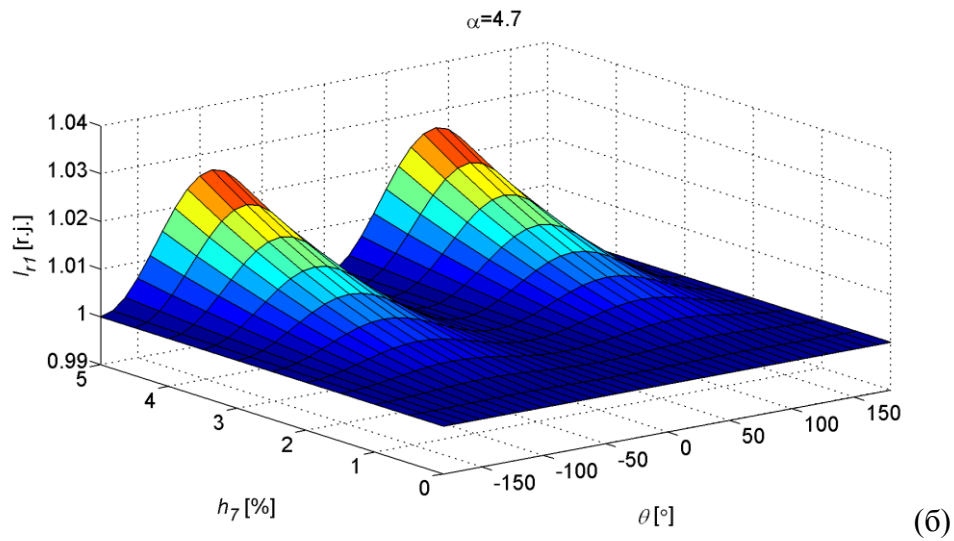
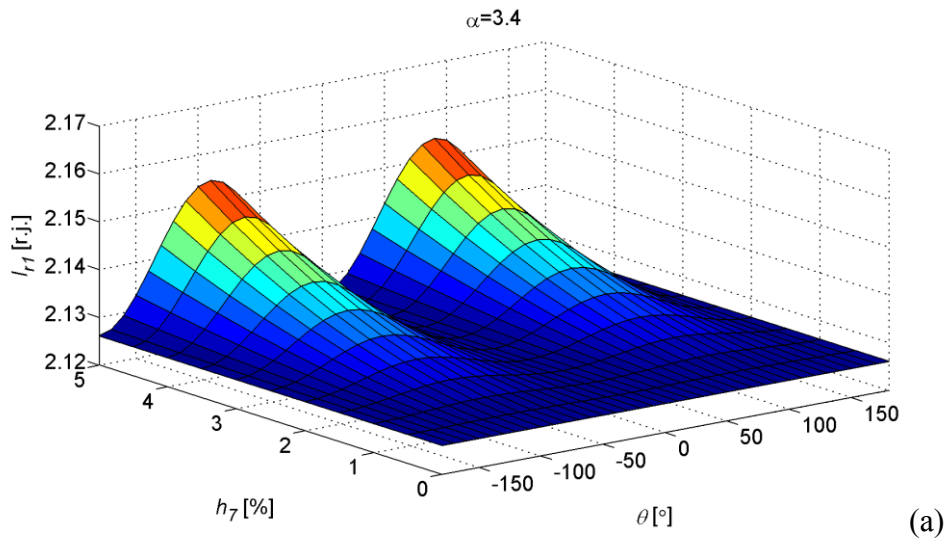
Сл. П4.0.7 Утицај амплитуде и фазног става 5. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



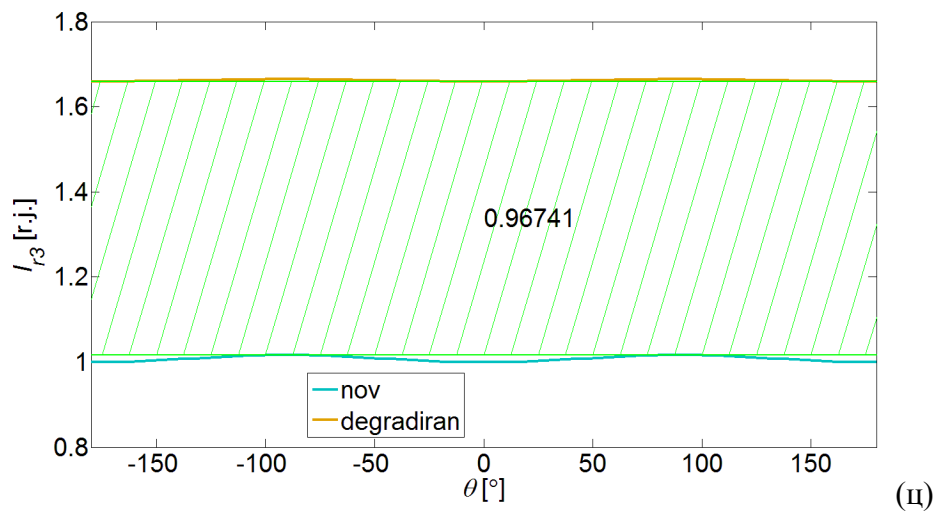
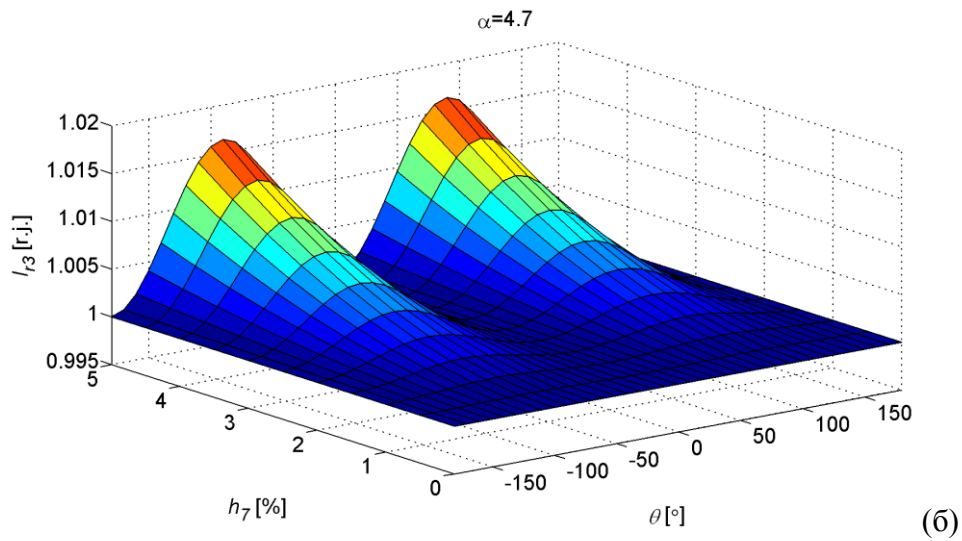
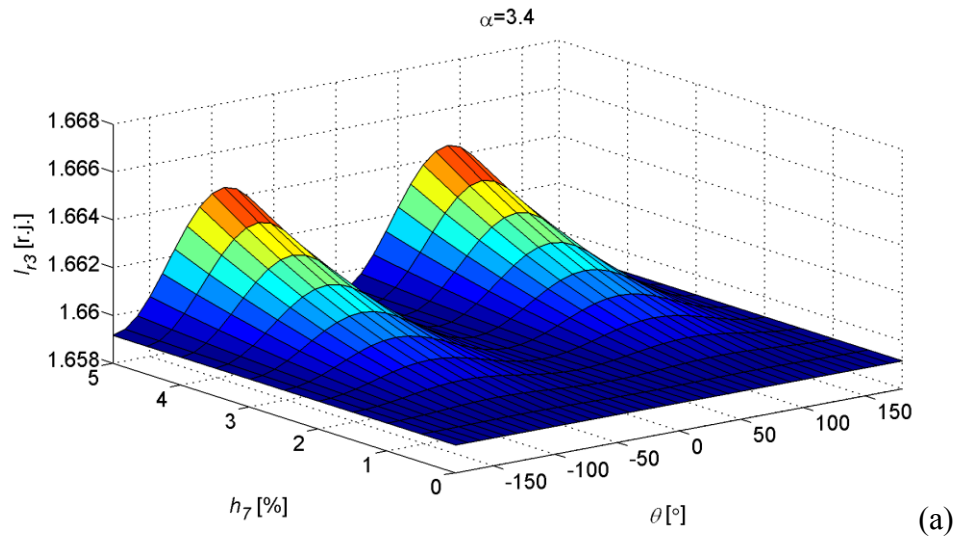
Сл. П4.0.8 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на основни хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б), МОП са приказом најкритичнијег случаја (ц)



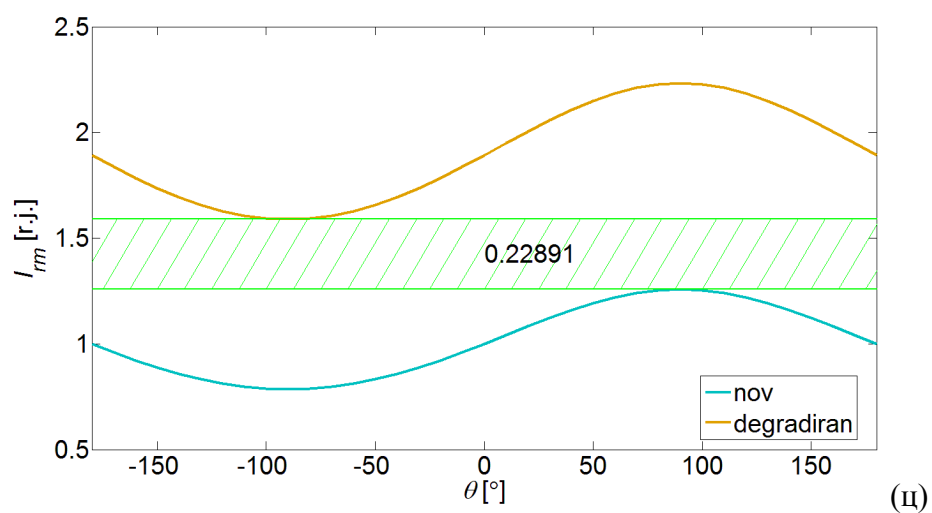
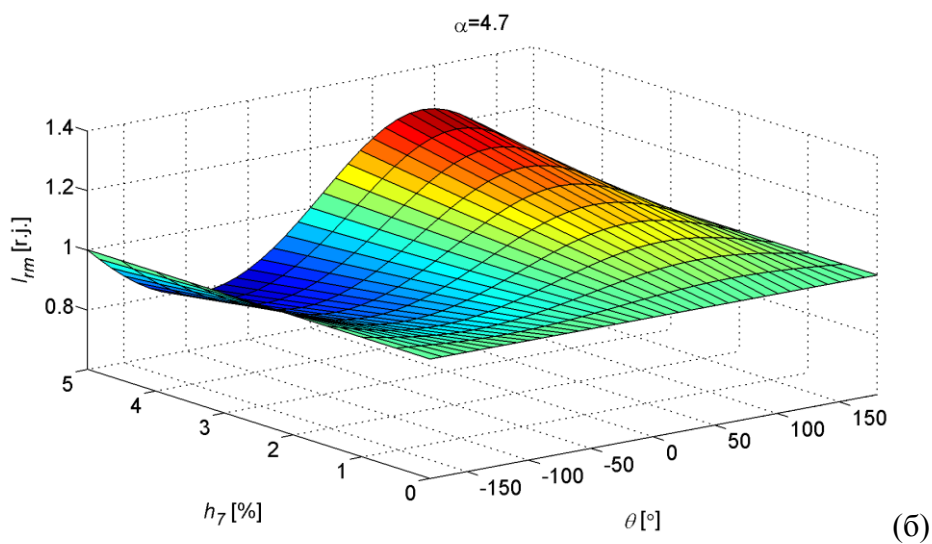
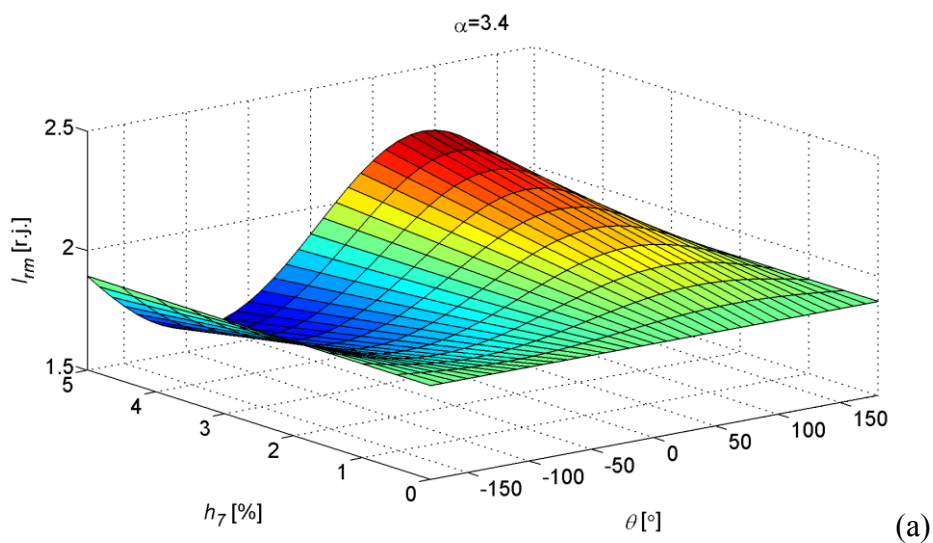
Сл. П4.0.9 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на трећи хармоник укупне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



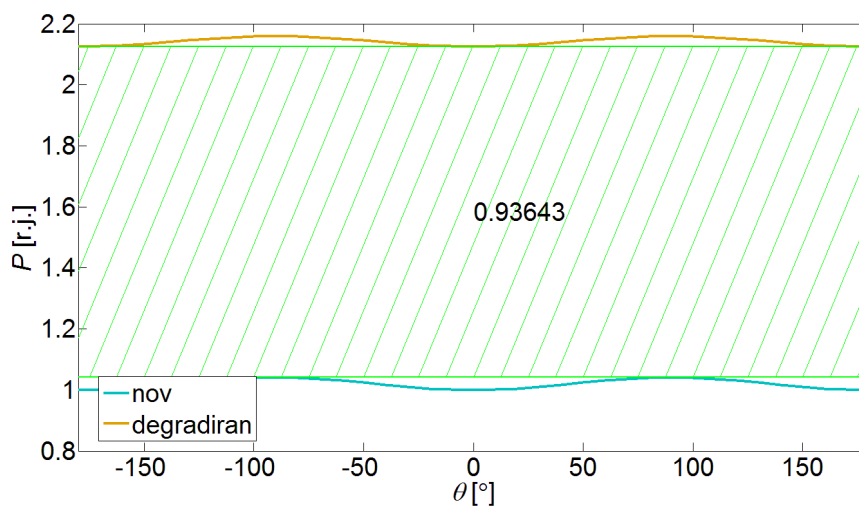
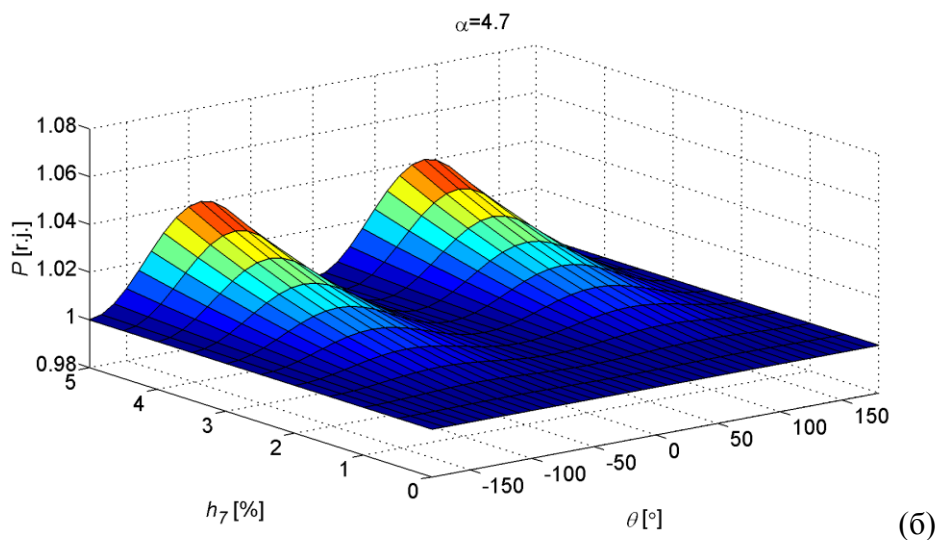
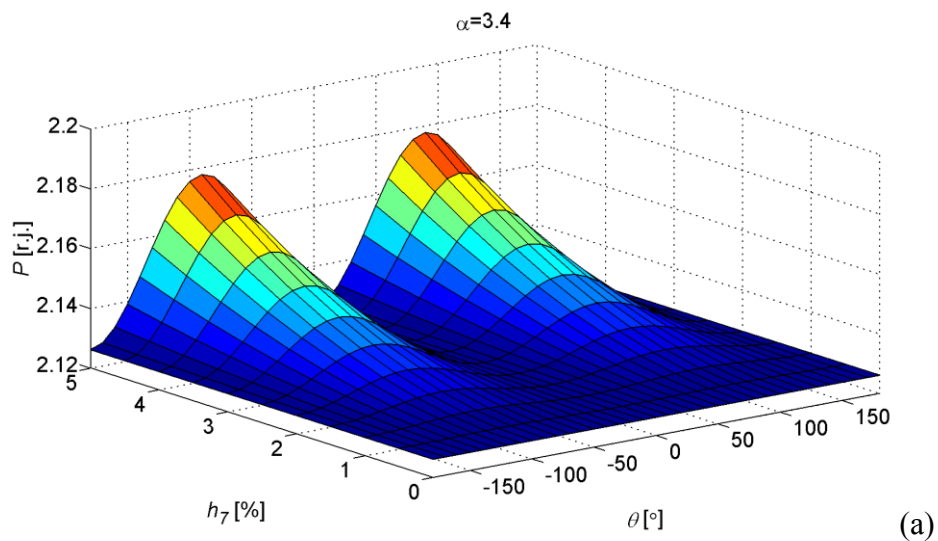
Сл. П4.0.10 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на основни хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



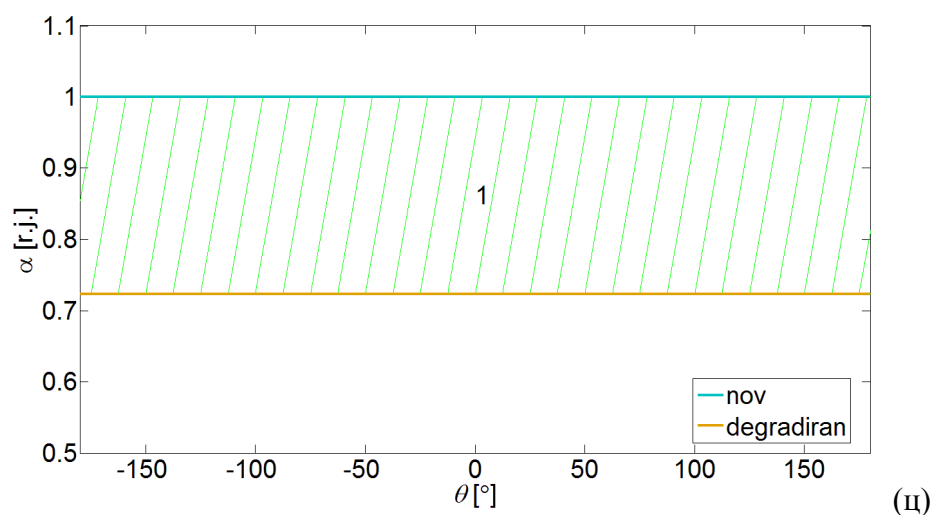
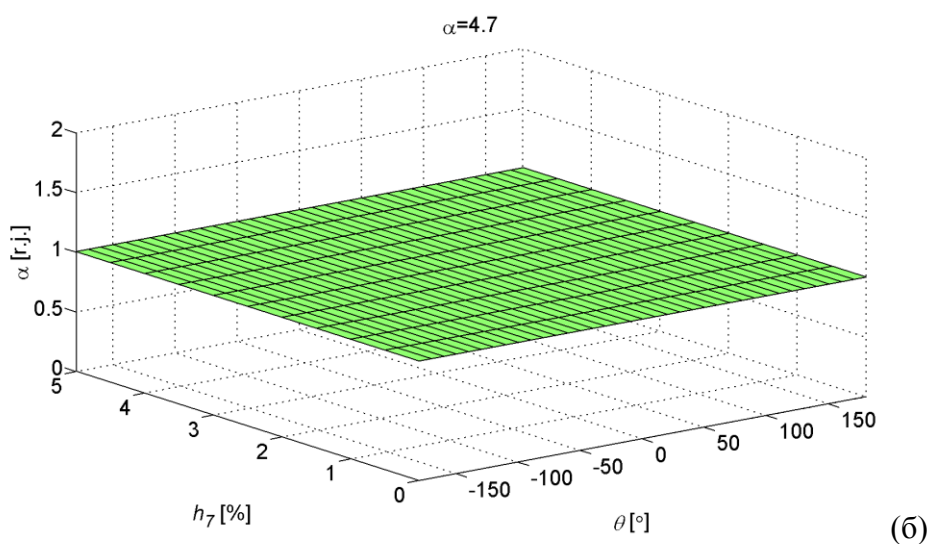
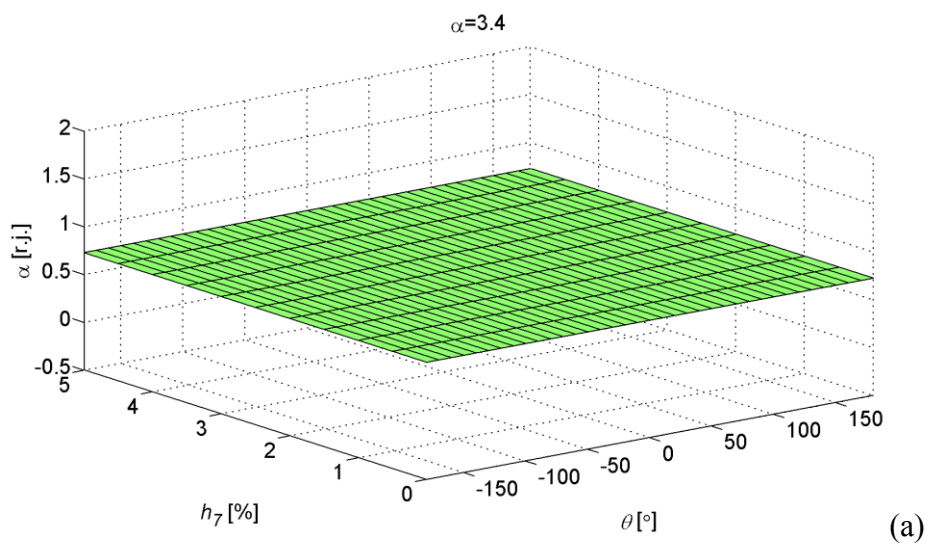
Сл. П4.0.11 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на трећи хармоник резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. П4.0.12 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на максималну вредност резистивне струје за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. П4.0.13 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на активну снагу губитака за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)



Сл. П4.0.14 Утицај амплитуде и фазног става 7. хармоника напона на коефицијент нелинеарности за деградиран (а) и нов (б) МОП, са приказом најкритичнијег случаја (ц)

Прилог 5 – Подаци о експериментима



Сл. П5.0.1 Фотографија коморе за загревање са одводником пренапона



Сл. П5.0.2 Фотографија експерименталне поставке

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О АУТОРУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Горан Добрић је рођен 1986. године у Сремској Митровици, где је завршио основну школу и гимназију. Током основног и средњег образовања остварио је запажене резултате на такмичењима из области природних и друштвених наука и добитник је дипломе „Вук Стефановић Караџић“.

Студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2005. године. У току основних студија на Одсеку за енергетику - Смер за електроенергетске системе, остварио је просечну оцену 9,70. Дипломирао је 12.10.2009. године са оценом 10 на одбрани дипломског рада „Развој софтвера за пројектовање мрежно-повезаних фотонапонских система“. Ментор приликом израде дипломског рада је био проф. др Никола Рајаковић. Добитник је награде за студента генерације на Катедри за електроенергетске системе 2009/2010. године.

Мастер студије на Електротехничком факултету, Смер за електроенергетске системе, уписао је 2009. године. У току мастер студија остварио је просечну оцену 10,00. Мастер студије је завршио 29.09.2010. године са оценом 10 на одбрани мастер рада „Анализа енергетске ефикасности фотонапонских система у реалним условима експлоатације“. Ментор приликом израде мастер рада је био доц. др Јован Микуловић. Добитник је награде Привредне коморе Београда за најбољи мастер рад 2010. године на Универзитету у Београду.

Током студија обавио је две једномесечне праксе. Током августа 2008. године био је на пракси у компанији "BDSP (Yu) d.o.o. Consulting Engineers", Београд на пословима пројектовања инсталација ниског напона. Током јула 2009. године био је на пракси у компанији Енергопројект ЕНТЕЛ, Доха, Катар, током које је сарађивао на пројекту пумпних станица катарске компаније "Qatar Petroleum (QP)", једној од највећих светских компанија у области транспорта гаса.

Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао је 2010. године. У току студија положио је све испите предвиђене студијским планом и програмом Модула за електроенергетске мреже и системе, са просечном оценом 10. Поред тога, пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета, на јавној усменој одбрани, успешно је положио докторски испит, одржан 13.3.2015. године.

Од фебруара 2011. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду као асистент у настави. Током свог рада био је ангажован у извођењу вежби на табли и лабораторијских вежби из 14 предмета уже научне области Електроенергетски системи и то: Анализа електроенергетских система 1, Анализа електроенергетских система 2, Регулација електроенергетских система, Практикум из софтверских алата у електроенергетици, Пројектовање помоћу рачунара у електроенергетици, Електрична мерења 1, Електрична мерења 2, Техника високог напона 2, Практикум из анализе електроенергетских система, Практикум - лабораторијске вежбе из електроенергетских система, Интелигентне електроенергетске мреже, Квалитет електричне енергије, Регулација електроенергетских система са обновљивим изворима енергије, Технички системи управљања у електроенергетским системима. Од 2012. до 2015. године обављао је функцију секретара Катедре за електроенергетске системе.

Аутор је 6 радова у међународним часописима са SCI листе, 8 радова на конференцијама међународног значаја, као и 6 радова на конференцијама националног значаја. Учествовао је у изради 9 студија и пројеката чији је реализатор Електротехнички факултет у Београду.

Активно се служи енеглеским језиком и има почетно знање немачког језика.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани: Горан Ј. Добрић

Број уписа: 5001/2010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Мониторинг и дијагностика стања металоксидних одводника пренапона на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже

- 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.

У Београду, 25. 5. 2016.

Потпис докторанда



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

Име и презиме аутора: Горан Ј. Добрић

Број уписа: 5001/2010

Студијски програм: Електротехника и рачунарство

Наслов рада: Мониторинг и дијагностика стања металоксидних одводника пренапона на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже

Ментор: др Златан Стојковић, редовни професор

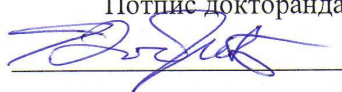
Потписани: Горан Ј. Добрић

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 мрежнимстраницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 25.5.2016.

Потпис докторанда


ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

Мониторинг и дијагностика стања металоксидних одводника пренапона на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже

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

У Београду, 25.5.2016.

Потпис докторанда
