

Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје Факултет за електротехника и информациски технологии



АНАЛИЗА НА ОДЗИВОТ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА ВО НЕСИНУСНИ УСЛОВИ

-докторска дисертација-

Ментор

проф. д-р Владимир Димчев

Кандидат

м-р Кирил Демерџиев

Скопје, 2023

Ментор:

проф. д-р Владимир Димчев

Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје,

Факултет за електротехника и информациски технологии

Членови на комисија за оцена и одбрана на докторската дисертација:

проф. д-р Марија Чундева – Блајер

Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје,

Факултет за електротехника и информациски технологии

проф. д-р Живко Коколански

Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје,

Факултет за електротехника и информациски технологии

вон. проф. д-р Маре Србиновска

Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје,

Факултет за електротехника и информациски технологии

проф. д-р Платон Совиљ

Универзитет во Нови Сад,

Факултет за технички науки

Датум на одбрана: _____

Датум на промоција: _____

Научна област: Метрологија на електрични величини

СОДРЖИНА

ЛИСТА НА СЛИКИ	7
ЛИСТА НА ТАБЕЛИ	. 11
АПСТРАКТ	. 12
ABSTRACT	. 14
1. ВОВЕД	. 16
1.1. Преглед на достигнувањата во научната област	. 16
1.2. Цели и тек на истражувањето	. 20
1.3. Очекуван придонес од истражувањето и понатамошна примена на резултатите	. 22
1.4. Структура на докторската дисертација	. 22
2. МАТЕМАТИЧКИ ПРИКАЗ НА ВИШИТЕ ХАРМОНИЦИ	. 25
2.1. Општи формулации	. 25
2.2. Активна моќност при хармониски – изобличени напони и струи	. 28
2.3. Реактивна моќност при хармониски – изобличени напони и струи	. 29
2.4. Привидна моќност и фактор на моќност при хармониски – изобличени	
напони и струи	. 31
3. ПРЕГЛЕД НА МЕРНАТА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА	. 36
3.1. Принцип на работа на различни уреди за мерење електрична моќност/енергија	. 36
3.1.1. Индукциски (електромеханички) броила	. 36
3.1.2. Електронски броила	. 39
3.1.3. Дигитални броила	. 40
3.1.4. Броила за реактивна енергија	. 41
3.2. Еталони за електрична моќност/енергија во Лабораторија за Електрични Мерења (ЛЕМ)	. 44
4. ПРВИЧНИ ИСПИТУВАЊА БРОИЛА СО НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ	. 50
4.1. Основни податоци за испитуваните уреди и калибрација со синусни сигнали	. 50
4.2. Предложени хармониски – изобличени тест сигнали	. 52
4.3. Резултати од испитување на броилата со хармониски – изобличени напони	ĺ
и струи	. 55

. ГРЕШКИ КАЈ ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ АКТИВНА МОЌНОСТ	
1/ИЛИ ЕНЕРГИЈА ПРИ НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ	60
5.1. Воведни забелешки	60
5.2. Резултати од процедура која одговара на променлив почетен фазен агол и струен хармоник, <i>θ</i> _i 5	на 62
5.3. Резултати од процедура која одговара на променлив почетен фазен агол напонски хармоник, θ_{u5}	на 64
5.4. Резултати од процедура која одговара на променлив удел на струен хармоник, <i>i</i> 5,%	67
5.5. Резултати од процедура која одговара на променлив удел на напонски хармоник, <i>u</i> 5,%	69
5.6. Резултати од процедура која одговара на променлив ред, <i>h</i> , на вишите хармоници во тест сигналите	71
5.7. Резултати од дополнителни сетови мерења за верификација на математичкиот модел	73
5.8. Математички модел за приказ на грешките при случајни хармониски изобличувања и негова валидација	76
. – ГРЕШКИ КАЈ ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ РЕАКТИВНА МОЌНОСТ ИЛЛИ ЕНЕРГИЈА ПРИ НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ	83
6.1. Воведни забелешки	83
6.2. Испитуван уред и калибрација во синусни услови	85
6.3. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната фундаментална реактивна моќност, <i>Q</i> 1	86
6.4. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната реактивна моќност пресметана согласно дефиницијата на <i>Budeanu</i> , <i>Q</i> _B	91
6.5. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната реактивна моќност пресметана согласно дефиницијата на <i>Fryze</i> , <i>Q</i> _F	95
6.6. Мерење реактивна моќност при хармониски – изобличени сигнали, со лабораторискиот примарен еталон, ZERA COM3003	100
. МОДЕЛИРАЊЕ БУЏЕТ НА МЕРНА НЕОДРЕДЕНОСТ	110
7.1. Општ пристап кон изразувањето мерна неодреденост во несинусни услови	110
7.2. Математичко моделирање на мерната неодреденост	112
7.2.1. Мерна неодреденост на директно мерените големини	112
7.2.2. Мерна неодреденост придружена кон пресметковно добиените големини	117

ЛИСТА НА СЛИКИ

Поглавје 2

Слика 2.1 Аритметички и векторски пристап за пресметка на привидната моќ	ност
во хармониски – изобличени услови	33

Поглавје 3

Слика 3.1 Шематски приказ на индукциско броило	. 37
Слика 3.2 Шематски приказ на електронско броило	. 39
Слика 3.3 Блок шема на дигитално броило за активна енергија	. 40
Слика 3.4 Операциски засилувач во конфигурација на интегратор	. 42
Слика 3.5 Блок шема на дигитален инструмент за индиректно мерење реактивна	
моќност/енергија	. 44
Слика 3.6 ZERA COM3003 и CALMET C300, примарен и секундарен еталон на ЛЕМ	r
во доменот на мерење електрична моќност и енергија	. 45
Слика 3.7 Приказ на а) Actual values и б) Harmonics мениата од примарниот еталов	H
ZERA COM3003	. 46
Слика 3.8 Прозорец за нагодување хармониско изобличување на софтверот	
Calpro 300	. 47
Слика 3.9 Прозорец за нагодување тест процедура за испитување броило на	
софтверот Calpro 300	. 47
Слика 3.10 Шема на поврзување трифазно броило за активна енергија во	
конфигурација за автоматизирано тестирање со САLMET С300	. 48

Слика 5.1 Резултати од испитување на броилото Landys+Gyr ZMD405CT44.2407 со синусни сигнали	61
Слика 5.2 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни	
вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$	63
Слика 5.3 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни	l
вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$	64
Слика 5.4 Релативни грешки при мерењето активна моќност, δ _P =f(φ1), за различни	
вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$	65
Слика 5.5 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни	l
вредности на θ _u 5, u5,%=10 %, i5,%=40 %, θ _i 5=60°	66
Слика 5.6 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, ΔP =f($ heta_{i5}$ - $ heta_{u5}$), за	
различни вредности на ф1, и5,%=10 %, і5,%=40 %	66
Слика 5.7 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни	
вредности на i5,%, и5,%=10 %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$	67
Слика 5.8 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, Δ P =f(φ1), за различни	l
вредности на i5,%, u5,%=10 %, θ_{u} 5=0°, θ_{i} 5=60°	68

Слика 5.9 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(i_{5,\%})$, за различни сподиости на со изу -10.9% $\rho_{z=-0^{\circ}}$ $\rho_{z=-60^{\circ}}$
$b p c h c m u h u \psi_1, u_5, \% - 10 / 0, v_{u5} - 0, v_{15} - 00 \dots 00$
Слика 5.10 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\partial_P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на и5.%. i5.%=40 %, $\theta_{45}=0^\circ$, $\theta_{55}=60^\circ$
Слика 5 11 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност AP=f(@1) за различни
вредности на $u_{5,\%}$, $i_{5,\%}=40\%$, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$
Слика 5.12 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, ΔP=f(u5,%), за
различни вредности на φ_1 , $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$
Слика 5.13 Релативни грешки при мерењето активна моќност, б _Р =f(φ1), за различен
<i>ред на вишите хармоници, h, u_{h,%}=10 %, i_{h,%}=40 %, θ_{uh}=0°, θ_{ih}=60°72</i>
Слика 5.14 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, ΔP=f(φ1), за различен
ред на вишите хармоници, h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $\theta_{uh}=0^{\circ}$, $\theta_{ih}=60^{\circ}$
Слика 5.15 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различна
ефективна вредност на испитната струја, I, $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$ 74
Слика 5.16 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различна
ефективна вредност на испитната струја, I, $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u_5}=0^\circ$, $\theta_{i_5}=60^\circ$ 74
Слика 5.17 Релативни грешки при мерењето активна моќност. δ _P =f(φ ₁), за различни
мерни vpedu, us %=10 %, is %=40 %, θ_{u} 5=0°, θ_{v} 5=60°
Слика 5.18 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност. ЛР=f(@1). за различни
мерни уреди, из %=10 %, is %=40 %, θ_{45} =0°, θ_{55} =60°
Слика 5 19 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност. ЛР=f(@1). со
слика 5.1.) Писолуший срешки при мереюсто икпиона мокност, $\Delta = f(\varphi I)$, со примарниот сталон 7FRA COM3003 при испитување со преиот сет тест
примирниот сталон, 22101 сон13003, при испитубилос со проиот сет тест сизиали
$C_{\pi\mu\nu\alpha} = 5.20$ An computer and more and armining more $AP = f(\alpha_1)$ co
Слика 5.20 Ансолутни срешки при мерењето иктивни мокност, $\Delta I = J(\psi I)$, со
примарниот еталон, ZEKA COM5005, при испитување со вториот сет тест
сигнали
Слика 5.21 Апсолутни грешки при мерењето активна мокност, ΔP=f(φ1), со примарниот еталон, ZERA COM3003, при испитување со третиот сет тест
сигнали

Слика 6.1 Интринсични грешки на испитуваното броило, $\delta_{Qsin}=f(arphi),~U=58~{ m V}$ и	
<i>I</i> =5 A	. 86
Слика 6.2 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{1,3f} ,	
$\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , и5,%=10 %, i5,%=40 %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$. 87
Слика 6.3 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{1,3f} ,	
$\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$. 88
Слика 6.4 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q1,3ƒ,	
$\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$. 89
Слика 6.5 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _C 300=Q1,3ƒ,	
$\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на и5,%, i5,%=40 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$. 89

Слика 6.6 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q1,35,
δ_{Q1} =f(φ_1), за различен ред на вишите хармоници h, $u_{h,\%}$ =10 %, $i_{h,\%}$ =40 %, $ heta_{uh}$ =0°,
$\theta_{ih}=60^{\circ}$
Слика 6.7 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{B,3f} ,
$\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$
Слика 6.8 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _C 300=Q _{B,3f} ,
$\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$
Слика 6.9 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Qc300=QB,3f,
$\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$
Слика 6.10 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$,
$\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на и5,%, i5,%=40 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$
Слика 6.11 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{С300} =Q _{B,3f} ,
$\delta_{QB}=f(arphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $ heta_{uh}=0$ °,
$\theta_{ih}=60^{\circ}$
Слика 6.12 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{F,3f} ,
$\delta_{QF}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$
Слика 6.13 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{F,3f} ,
$\delta_{QF}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$
Слика 6.14 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{F,3f} ,
$\delta_F = f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, $\theta_{u5} = 0^\circ$, $\theta_{i5} = 60^\circ$
Слика 6.15 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _C 300=Q _{F,3f} ,
$\delta_F = f(\varphi_1)$, за различни вредности на и5,%, i5,%=40 %, θ_u 5=0°, θ_i 5=60°
Слика 6.16 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога Q _{C300} =Q _{F,3f} ,
δ_F =f(φ_1), за различен ред на вишите хармоници h, $u_{h,\%}$ =10 %, $i_{h,\%}$ =40 %, $ heta_{uh}$ =0°,
$\theta_{ih}=60^{\circ}$
Слика 6.17 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со виши хармоници од 5 ^{mu} ред 102
Слика 6.18 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со случајно хармониско изобличување 102
Слика 6.19 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со виши хармоници од 5 ^{mu} ред 104
Слика 6.20 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}, \delta_{QB}=f(\varphi_1),$ при тест сигнали со случајно хармониско изобличување . 105
Слика 6.21 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}, \delta_{QF}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со виши хармоници од 5 ^{mu} ред 106
Слика 6.22 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003,
кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}, \delta_{QF}=f(\varphi_1),$ при тест сигнали со случајно хармониско изобличување . 107

Слика 7.1 Проширена комбинирана неодреденост придружена кон мерената акт	ивна
моќност, пресметана согласно директен (валиден за синусни услови) и индирект	ен
пристап на евалуација	125

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Поглавје 4

Табела 4.1 Технички карактеристики за трите испитувани броила	51
Табела 4.2 Резултати од калибрацијата на трите броила со синусни наизменични	
сигнали	52
Табела 4.3 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници	
во првиот сет тест сигнали	53
Табела 4.4 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници	
во вториот сет тест сигнали	54
Табела 4.5 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници	
во третиот сет тест сигнали	54
Табела 4.6 Резултати од испитувањето на трите броила со првиот сет хармониски –	
изобличени сигнали	56
Табела 4.7 Резултати од испитувањето на трите броила со вториот сет хармониски -	_
изобличени сигнали	57
Табела 4.8 Резултати од испитувањето на трите броила со третиот сет хармониски -	_
изобличени сигнали	57

Поглавје 5

Табела 5.1 Вредности за параметрите на вишите хармоници во секоја процедура од	
испитниот протокол	61
Табела 5.2 Релативен удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници во	
трите сета тест сигнали за валидација на предложениот математички модел	79

Поглавје 6

Табела 6.1 Вредности за параметрите на вишите хармоници во секоја процедура	а од
испитната постапка	84

Габела 7.1 Удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници во испитните	
сигнали	122
Табела 7.2 Буџет на мерна неодреденост при мерењето $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$ за $\varphi_1=0^\circ$	123
Табела 7.3 Буџет на мерна неодреденост при мерењето <i>u_h</i> ,% и <i>i_h</i> ,% за <i>φ</i> 1=60°	123
Табела 7.4 Буџет на мерна неодреденост при мерењето θ_{uh} и θ_{ih} за $\varphi_1=0^\circ$	
Табела 7.5 Буџет на мерна неодреденост при мерењето θ_{uh} и θ_{ih} за $\varphi_1 = 60^{\circ}$	

АПСТРАКТ

Развојот на полупроводничките технологии, континуирано придонесува за зголемено присуство на нелинеарните електрични потрошувачи во сите сфери на човековото живеење и делување. Овие потрошувачи го нарушуваат квалитетот на електрична енергија и претставуваат најчест извор на хармониски изобличувања на мрежните напони и струи. Бидејќи присуството на хармониски – изобличени сигнали е реалност во електроенергетскиот систем, се поставуваат нови барања за точност при мерење различни параметри на системот, во наведените несинусни услови. Во постоечките меѓународни стандарди и препораки, покрај ограничувањата на грешките кај различни инструменти, наведени се и испитни постапки, кои треба да послужат како основа за тестирање на мерната опрема во реален работен режим. Посебен научен, но и стопанствен, интерес, претставува верификацијата на перформансите на уредите за мерење електрична моќност и/или енергија во несинусни услови, поради позицијата на овие инструменти во сферата на законската метрологија, т.е. во регулираната наплата на електрична енергија.

Постојат повеќе предизвици при воспоставувањето протокол за тестирање инструменти за мерење електрична моќност и/или енергија во несинусни услови. Основен проблем претставува лабораториската репродукцијата на сите можни напонски и струјни изобличувања, кои можат да се јават на едно мерно место во текот на експлоатацискиот век на мерилото. Дополнителен проблем претставуваат различните алгоритми за мерење, имплементирани во поединечни уреди, кои резултираат со речиси идентичен одзив при синусни услови, но со различен резултат од мерењето, во присуство на виши хармоници. Последново е особено изразено кај уредите за мерење реактивна моќност/енергија, каде како компликација се јавува и фактот што научната заедница, досега, нема обезбедено еднозначна дефиниција за терминот *реактивна моќност* во хармониски – изобличени услови.

Имајќи ги предвид однапред наведените потешкотии при испитувањето инструменти за мерење електрична моќност и/или енергија во несинусни услови, во докторската дисертација ќе бидат прикажани резултати од детална испитна постапка која опфаќа повеќе мерила за конкретните физички величини, во кои се имплементирани различни алгортими за мерење. Фокусот ќе биде ставен на последната генерација, дигитални инструменти. Како основа за воспоставување испитен протокол ќе послужат хармониски – изобличени сигнали наведени во постоечките стандарди, кои во текот на анализата ќе претрпат извесни промени од аспект на вредноста на поединечните параметри на вишите хармоници. Одзивот на испитуваните уреди ќе биде анализиран, првенствено, од перспектива на алгоритамот за мерење, односно од аспект на неговата сообразност за мерење моќност/енергија при хармониски – изобличени сигнали. Измерените отстапувања кај поединечните уреди ќе бидат групирани во однос на вредноста на хармонискиот параметар кој се менува, за да може да се примени математичко моделирање на реалниот одзив на мерилата. Врз база на математичкиот модел, би можел да се извлече заклучок за начинот на кој испитуваниот уред ја регистрира мерената големина. Неговата валидација ќе биде спроведена преку тест сигнали кои поседуваат случајно изобличување, со употреба на мерна инструментација од највисока класа на точност. Кај уредите за мерење реактивна моќност/енергија, одзивот на мерилата, односно интензитетот на отстапувањата, ќе биде анализиран дополнително и во

однос на најчесто применетите дефиниции, усвоени за пресметка на конкретните величини во несинусни услови.

Анализата на одзивот на инструментите за мерење електрична моќност и/или енергија во несинусни услови ќе биде комплетирана со математички модел за пресметка и приказ на мерната неодреденост. Воспоставувањето буџет на мерна неодреденост ќе биде базирано на разложување на мерните сигнали на поединечни, фундаментални и хармониски, компоненти и евалуација на поединечните влијателни фактори, придружени кон мерењето на истите. Моделот за приказ на мерната неодреденост ќе биде развиен врз база на принципите за евалуација пропишани во меѓународното *Упатство за изразување мерна неодреденост*, а истиот ќе биде валидиран преку реални резултати од мерење со инструментација од највисока класа на точност. Врз база на заклучоците од реалните мерења, ќе биде спроведена симулациска анализа на промената на мерната неодреденост, придружена кон измерената моќност и/или енергија, во однос на промената на интензитетот на различни параметри на вишите хармоници, присутни во спектарот на сигналите.

Клучни зборови: инструменти за мерење електрична моќност/енергија, виши хармоници, електрични броила, еталони, функции на грешка, фазно поместување, мерна неодреденост.

ABSTRACT

The semiconductor technology development continuously leads to an increase of the presence of non – linear electrical loads in all aspects of human life and activity. These loads are responsible for the disruption of the power quality and represent the most common source of harmonic distortion in system's voltages and currents. Since the prevalence of harmonically distorted signals is a reality in the electric power systems, new accuracy requirements are proposed, regarding the measurement of different systems' parameters, in the specified non – sinusoidal conditions. In the existing international standards and recommendations, in addition to the error limits prescribed to different instrument types, test procedures are proposed as well, which are supposed to serve as a basis for examination protocols establishment, reproducing real operating conditions. The performance verification is especially important in case of electrical power and/or energy instruments, due to their place in the legal metrology sphere, i.e. in the regulated trade of electrical energy.

Multiple challenges are present, when establishing examination protocol, for electrical power and/or energy instruments inspection, under non-sinusoidal conditions. The fundamental problem is the fact that not every possible distortion of the voltage and current signals, which can occur at a measurement site during the operational cycle of the meter, may be faithfully reproduced in laboratory conditions. An additional problem are the multiple, commercialy available, measuring algorithms, implemented in individual devices, which result in almost identical meters' response in sine – wave conditions, but may display a totally different value of the measured quantity, in the presence of high order harmonics. The latter is especially pronounced as a significant complication, in case of reactive power/energy measuring instruments' performance evaluation, regarding the fact that the scientific community has not yet provided a clear definition for the term *reactive power* in harmonically distorted environment.

Taking into account the aforementioned complications, in the doctoral thesis, the results of detailed examination procedures, conducted in non - sinusoidal conditions, regarding testing of electric power and/or energy instruments, in which different measurement algorithms are implemented, will be presented. Digital instruments of the latest genearion will be subject of examination, predominantly. Harmonically distorted signals, specified in the existing standards, will serve as a basis for test protocol establishment. However, the test signals will undergo certain alteration from the standards' proposals during the examination, in order for the response of the meter, in relation to the change of different harmonic parameters, to be analyzed. The response of the tested instruments will be primarily regarded from the perspective of the implemented measuring algorithm, that is, from the aspect of its suitability for power and/ or energy recording in harmonically distorted conditions. The recorded deviations between the applied and the measured power/energy, for a unique instrument, will be grouped according to the value of the altered harmonic parameter, so that mathematical modeling of the meter's actual response may be conducted. Based on the mathematical model, a conclusion may be derived, regarding the way the tested device records the measured quantity. Its validation will be carried out by introducing test signals that possess random harmonic distortion and by using instrumentation of the highest accuracy class available. In case of devices for reactive power/energy measurement, the response of the meters, that is, the intensity of the recorded deviations, will be analyzed, additionally, in relation to the most commonly applied definitions, adopted for the calculation of the concrete quantity in non - sinusoidal conditions.

The electrical power and/or energy instruments' response analysis, in non – sinusoidal conditions, will be concluded with the introduction of a mathematical model for measurement uncertainty calculation and presentation. The measurement uncertainty budget will be evaluated by decomposition of the measured signals into individual, both fundamental and harmonic, components and by analytical expression of different influence factors, attributed to their direct recording. The mathematical modelling of the measurement uncertainty will be based on the principles presented in *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*, and the model itself will be validated via real – time measurements, conducted with instrumentation of the highest accuracy class. Based on the conclusions from the real – time measurements, a propagation analysis of the measurement uncertainty, attributed to the measured power and/or energy, will be carried out, in relation to the alteration of different high order harmoncs' parameters, present in the signals' waveforms.

Keywords: instruments for measurement of electrical power/energy, high order harmonics, electricity meters, reference standards, error functions, phase shift, measurement uncertainty.

1. ВОВЕД

1.1. Преглед на достигнувањата во научната област

Првичните сознанија, за она што подоцна ќе биде идентификувано како квалитет на електрична енергија, датираат од самиот почеток на развој на електроенергетиката. Уште во првите децении од XX век, за прв пат се забележани изобличувања кај трифазните напони и струи, предизвикани од заситување на магнетните јадра кај трансформаторите и електричните машини [1], феномен кој денес е утврдено дека резултира со појава на тројни хармоници. Како резултат на забележаните изобличувања, била наведена препорака за поврзување на примарната намотка на трансформаторот во конфигурација на триаголник и се започнало со користење на магнетни материјали со подобрени својства за димензионирање на јадрата, со цел елиминирање на гореспоменатите појави [2]. Усовршениот дизајн на електричните и магнетните кола на електричните машини резултирал со речиси комплетно надминување на наведените проблеми, барем до периодот на 30^{тите} и 40^{тите} години од минатиот век.

Во периодот помеѓу двете светски војни, направен е голем пробив во електрификацијата, телефонското и телеграфското поврзување на руралните средини. Електричните проводници биле водени заедно со врските за телефонска мрежа, па заради постоењето индуктивна спрега, постоечките изобличувања на наизменичните електрични сигнали, предизвикани од инсталираните трансформатори и исправувачи, резултирале со интерференции врз телефонските сигнали [1].

Терминот "квалитет на електрична енергија" за општа класификација на сите мрежни изобличувања, кој е во официјална употреба и денеска, се воведува кон крајот на 70^{тите} и почетокот на 80^{тите} години од минатиот век. Тоа е периодот во кој настанува масовен пробив на полупроводничките технологии во речиси сите сфери на човековото живеење и делување [1-3]. Оттогаш започнува деталното изучување на причините за појава на изобличувања на електричните сигнали во електроенергетскиот систем, како и последиците од овие изобличувања врз различни сегменти од системот. Еден од најпроучуваните феномени, кои припаѓаат во доменот на квалитетот на електрична енергија, се вишите хармоници.

Вишите хармоници претставуваат компоненти во наизменичните сигнали, чијашто фреквенција е целоброен мултипл на основната (фундаментална) фреквенција од 50 Hz или 60 Hz [1-9]. Изворот на овие изобличувања, вообичаено се лоцира во нелинеарните потрошувачи на електрична енергија, иако истите можат да се јават и од страната на производствените капацитети, но и да бидат резултат на појави во самиот преносен и дистрибутивен систем (заситени магнентни јадра на преносни и дистрибутивни трансформатори) [5-7, 10-12]. Вишите хармоници се откриени одамна, пред официјалното воспоставување на квалитетот на електрична енергија како посебно поле на проучување. За тоа сведочат, меѓу другото, и различните дефиниции за реактивна моќност, која до ден денешен не е еднозначно определена во случај на несинусни сигнали, предложени најпрво од страна на научниците *Budeanu* [13] и *Fryze* [14], а подоцна и од други автори: *Kusters – Moore, Page, Shepard – Zakikhani, Sharon,* [8-9, 15-18] итн.

Зголемената употреба на полупроводничките елементи во потрошувачите на електрична енергија, резултира со изразена нелинеарност на целокупниот електричен конзум, па следствено на тоа се јавуваат значителни изобличувања на мрежните напони и струи. Овие

изобличувања предизвикуваат несакани ефекти во системот, како што се [7, 10]: зголемени Џулови загуби како резултат на површинскиот (скин) ефект, протекување на големи струи низ неутралниот проводник поради суперпозиција на тројните хармоници од сите три фази кои меѓусебно не се фазно поместени, стареење на изолацијата заради изразените врвни вредности на напонските сигнали, како и грешки при мерењето на параметрите на системот, имајќи предвид дека мерната инструментација е примарно дизајнирана за работа во синусен работен режим.

Гледано од метролошки аспект, од посебен научен, но и стопанствен, интерес е однесувањето на уредите за мерење електрична моќност и/или енергија, при хармониски изобличени напони и струи. Ова се должи на апликацијата на овие уреди во доменот на законската метрологија, односно нивното место и примена во регулираната наплата на електрична енергија. Потребата од квантитативна и квалитативна анализа на одзивот на инструментите за мерење електрична моќност и/или енергија, во хармониски – изобличени услови, е во согласност со воведената Директива на Европскиот Парламент и Совет од 2004 година, 2004/22/ЕС [19], подоцна надополнета и заменета со Директива на Европскиот Парламент и Совет од 2014 година, 2014/32/ЕИ [20]. Според овие документи, мерните инструменти и уреди кои наоѓаат примена во доменот на: јавниот интерес, јавното здравје, јавниот ред, заштитата на животната средина, заштитата на потрошувачите и регулираната трговија; не смеат да ја прикажуваат мерената големина со поголемо отстапување од усвоената максимално дозволена грешка, при нормални работни услови. Бидејќи присуството на виши хармоници во мрежните напони и струи е реалност, нормалните работни услови, од аспект на правилно функционирање на електричната инструментација, повеќе не подразбираат работна околина во која се среќаваат строго синусни наизменични сигнали. Во тој случај, максимално дозволената грешка не е детерминирана единствено од приложената спецификација на производителот, валидна за синусен работен режим, туку истата треба да опфати и дополнителни компоненти кои произлегуваат од постоечките ограничувања на изобличувањето на мрежните напони и струи [21-22].

Со цел утврдување на моменталната состојба на еден инструмент и неговите мерни можности за регистрирање електрична моќност и/или енергија во несинусни услови, потребно е истиот да подлежи на периодични испитувања со хармониски – изобличени напони и струи. Првичната дилема при воспоставувањето една ваква испитна постапка е поврзана со интензитетот на хармониските изобличувања кои ќе бидат применети. Имено, еден инструмент во текот на неговиот експлоатациски век, може да биде изложен на бесконечно многу различни сигнални изобличувања, со различен интензитет, претставени преку случајна вредност на уделот на поединечните хармониски компоненти и нивното фазно поместување. Дополнително, присуството на виши хармоници во некоја точка од системот има динамички карактер, односно самите изобличувања на сигналите можат да се менуваат со текот на времето поради различни фактори. Со други зборови, не секоја комбинација на виши хармоници присутни на мерното место, може да се предвиди, а со тоа и да се репродуцира во лабораториски услови [21-24].

Во доменот на испитување инструменти за мерење активна моќност и/или енергија во несинусни услови, постојат повеќе меѓународни стандарди и препораки. Како пример може да се наведат стандардите EN 50470 [25-27], во кои се прикажани максимално дозволените отстапувања при мерење на конкретните електрични величини, кои важат за уреди со различен мерен алгоритам (принцип на мерење) и кои припаѓаат на различна класа на точност. Покрај критичните вредности за максимално дозволените грешки, во наведените

стандарди [25-27], предложени се и испитни постапки, кои вклучуваат сигнали со однапред утврдено хармониско изобличување на напоните и струите. Типичен пример на стандардизирана постапка за испитување дигитални броила за активна енергија е пропишана во стандардот EN 50470-3 [27] и истата опфаќа сигнали во кои фигурираат виши хармоници од 5^{ти} ред, покрај фундаменталните компоненти. Уделот на 5^{тиот} напонски хармоник, во наведениот сет сигнали, изнесува 10 % од вредноста на фундаменталниот напон, додека амплитудата на 5^{тиот} струен хармоник изнесува 40 % од амплитудата на фундаменталната струја. И кај напонскиот и кај струјниот сигнал, вишите хармоници се во фаза со компонентите чијашто фреквенција изнесува 50 Hz, при минување на поединечните компоненти низ нулата, во моментот на почеток на позитивната полупериода [21-22, 27]. Алтернативен сет тест сигнали за истата намена, е претставен во Препораката R46-1&2 [28], предложена од страна на Меѓународната Организација за Законска Метрологија (фр. Organisation Internationale de Métrologie Légale – OIML). Во оваа препорака, покрај ограничувања на максимално дозволената грешка кај различни типови броила за активна енергија, предложени се неколку сета напонски и струјни тест сигнали, наменети за испитување на овие инструменти во хармониски – изобличени услови. Како пример можат да се наведат таканаречените Quadriform и Peaked бранови облици. Карактеристично за овие сетови тест сигнали е тоа што истите, во својот фреквентен спектар, поседуваат само непарни виши хармоници до 13^{ти} ред, кои се во фаза или се за 180° фазно поместени во однос на фундаменталните напони и струи. И кај двата сета сигнали, постои ограничување на вкупното хармониско изобличување, кое изнесува 5 % за напонските, односно 40 % за струјните сигнали. Покрај изобличувањето на напонските и струјните сигнали, во Препораката R46-1&2 [28], наведени се и мерни точки во кои би требало да се спроведе испитувањето на едно броило. Мерните точки се дефинирни преку опсегот за мерење струја на испитуваниот уред и различните фазни поместувња (фактори на моќност), кои се однесуваат на фундаменталните компоненти.

Горенаведените тест сигнали, заедно со други испитни постапки кои се наведени во постоечките стандарди и препораки [23-26], се прифатени од страна на бројни автори во рамки на нивните научни истражувања [21-24, 29-31]. Покрај овие бранови облици, во научната литература, предложени се и реализирани се тест протоколи кои вклучуваат сигнали во кои се среќаваат случајни хармониски изобличувања, со или без претходно ограничување на бројот на хармониски компоненти или степенот на вкупно хармониско изобличување [21-22, 32-42]. Во публикацијата на А. Ferrero & al. [21] презентирани се резултати од испитување комерцијално броило за активна енергија, спроведено со тест сигнали кои поседуваат случајни хармониски компоненти. Степенот на вкупно хармониско изобличување, како и варијациите на ефективната вредност на напонот и фундаменталната фреквенција, се претходно ограничени на вредности кои се пропишани со цитираните стандарди [27] и препорака [28]. Самата публикација [21] примарно се однесува на претставување оригинално изведен тест систем, кој е софтверски контролиран, како и на пресметка на мерната неодреденост при калибрацијата на броилото, која се сведува на суперпозиција на поединечни влијателни фактори, придружени кон генерираните хармоници со различни фреквенции. Друга публикација во која се применети тест сигналите предложени во стандардот [27], произлегува од истражувањето на A. Olencki & P. *Mroz* [22]. Во овој труд прикажана е споредба помеѓу резултати од тестирање дигитално броило за активна енергија во рамки на испитна постапка која опфаќа стандардизирани тест сигнали, и мерења спроведени со напони, односно струи, со случајни хармониски

изобличувања, при идентично ограничување на вкупната хармониска дисторзија. Заклучоците од оваа анализа се насочени кон одредување минимален број мерни точки, потребни за верификација на перформансите на броилото, имајќи предвид дека не секоја прилика која се јавува на мерното место, може да се преслика во лабораториски услови. L. Bartolomei & al. во своите изложувања [33-34], го анализираат однесувањето на броилата од аспект на времетраењето на изобличувањата и користат идентичен удел на виши хармоници во применетите напони и струи. Конкретните публикации, значително отстапуваат од предложеното во стандардите [25-27] и препораката [28], но и од реалните услови во пракса, имајќи предвид дека струјните изобличувања се вообичаено значително поголеми од напонските [43]. Дополнителен недостаток е фактот што тестирањата се спроведени за релативно тесен интервал на хармониски изобличувања, помеѓу 3 % и 8 %. Diahovchenko & al. се фокусираат на одзивот на различни типови броила во случај на хармониско – изобличени напони и струи [11, 32]. Во наведените публикации спроведено е математичко моделирање на одзивот на броилата за мерење активна енергија, со акцент на индукциските броила, во функција од фреквентниот спектар на компонентите присутни во испитните сигнали, и негова експериментална валидација. Слична анализа е презентирана и во публикацијата на *Caiceres*, *R & al.* [38]. Други автори, како *S. Masri & al.* [30-31] и *S.S.* Raza & al. [12] се фокусирани на анализа на интензитетот на грешките кај броила во кои се имплементирани различни алгоритми за мерење, при промена на фазното поместување помеѓу фундаменталните компоненти. Во постоечката научна литература се среќаваат и оригинални тест процедури, кои се базирани на максималните изобличувања кои се јавуваат во некоја точка од мрежата, Georgakopoulos & al. [35-36].

Постоечките стандарди и фактот дека поимот активна моќност/енергија е еднозначно дефиниран во хармониски – изобличена средина, отвараат можност за воспоставување рутински тест процедури, кои би опфатиле детално испитување на перформансите на еден мерен инструмент, во услови кои се од интерес на засегнатите страни, било да се тоа електроенергетски компании, регулаторни тела, или крајни потрошувачи. Од друга страна, во доменот на мерење реактивна моќност и/или енергија, ситуацијата е далеку посложена. Потешкотиите при дефинирањето стандардизирани протоколи за испитување уреди за мерење реактивна моќност/енергија можат да се илустрираат поаѓајќи од два основни аспекти. Најпрво, уште од првичните публикации на С. Budeanu [13] и S. Fryze [14], не постои консензус околу изразувањето на реактивната моќност во хармониски – изобличени услови. Овие две теории, кои ќе бидат детално дискутирани во понатамошниот дел од овој труд, се надополнувани и надоградувани од низа автори [9, 15-18], но ниту едно понудено решение не резултирало со општоприфатена дефиниција за поимот реактивна моќност во несинусни услови. Непостоењето општоприфатена дефиниција, резултира со дилема околу резултатот кој треба да го прикаже еден мерен уред. Вториот аспект, поради кој е практично невозможно да се воспостави стандардизиран протокол за испитување инструменти за мерење реактивна моќност/енергија во несинусни услови, е постоењето различни алгоритми за мерење имплементирани во поединечни мерни уреди. Во случај на напонски и струјни сигнали со чист синусен облик, постоечките алгоритми резултираат со идентичен одзив, но во присуство на виши хармоници, два или повеќе инструменти може да прикажат комплетно различна вредност, при идентични влезни сигнали [44-46]. На ова треба да се надоврзе и фактот што производителите на мерна опрема, вообичаено не го наведуваат алгоритамот за мерење во техничките спецификации на уредот.

Во постоечките стандарди IEC 62053 [47-50], прикажани се граничните вредности за грешките кај различни видови мерила за реактивна енергија, а при тоа реактивната енергија е дефинирана како компонента од вкупната енергија која произлегува од напоните и струите со фундаментална фреквенција. Слични барања по однос на мерењето на конкретните велични се пропишани и во стандардот IEEE 1459 [51]. Според IEEE 1459 [51], независно од брановиот облик на влезните сигнали, еден инструмент во рамки на декларираните граници на грешка, треба верно да ги регистрира единствено компонентите на вкупната моќност и/или енергија, кои произлегуваат од сигналите со фреквенција од 50 Hz. Конкретните барања, иако придонесуваат за делумна хармонизација на мерењето моќност и/или енергија во несинусни услови, со себе носат и дополнителни проблеми. Имено, барањето за мерење исклучиво на фундаменталните моќности, резултира со потреба од неопходни интервенции во постоечките мерни алгоритми кај повеќето комерцијално достапни инструменти, заради филтрација на моќностите кои произлегуваат од вишите хармоници. Доколку еден уред ја мери единствено фундаменталната активна или реактивна моќност/енергија се постигнува и неправична наплата на електрична енергија. Во ваков случај, потрошувачите кои се одговорни за појава на виши хармоници во системот остануваат неказнети за своите постапки, додека делот од конзумот кој ја користи изобличената енергија не добива извесни бенефиции за нејзината потрошувачка [43].

Постоечката научна литература, која се однесува на мерење реактивна моќност и/или енергија во несинусни услови, е примарно ориентирана во насока на испитување одзив на инструменти во кои се имплементирани различни алгоритми за мерење. Публикациите на A. Cataliotti & al. [52-56] се однесуваат на калибрација на броила за реактивна енергија, со различни референтни инструменти. Акцентот е ставен на потребата од избор на соодветен референтен инструмент, чијшто мерен алгоритам се совпаѓа со оној имплементиран во тестираниот уред. Во овие публикации [52-56], направена е и анализа на интензитетот на грешките кои би биле регистрирани доколку испитниот протокол се спроведе со користење на два разнородни уреди. Дополнителен научен придонес во доменот на испитување инструменти за мерење реактивна моќност и/или енергија е содржан во публикациите на А. Berrisford [43, 57-59]. Конкретните истражувања се спроведени во насока на одредување степен на усогласеност помеѓу постоечките комерцијално достапни уреди и барањата на стандардот IEEE 1459 [51]. Покрај анализа на грешките кај различни типови инструменти во услови на реални хармониски изобличувања [57], авторот презентира развој на оригинален мерен систем, кој е компатибилен со барањата за детекција единствено на фундаменталните компоненти на моќност [43, 58-59]. Постоечката литература, опфаќа и публикации, во кои е спроведена анализа на одзивот на други типови уреди од електроенергетската пракса, како што се паметните броила и мерните трансформатори, при несинусни напони и струи [60-64].

1.2. Цели и тек на истражувањето

Во постоечката литература, документирани се повеќе предизвици и понудени се алтернативни решенија во доменот на испитување различни уреди за мерење електрична моќност и/или енергија, во несинусни услови. Дел од предложените протоколи за тестирање се во потполна корелација со барањата наведени во постоечките стандарди [21-22, 29], а во останатите, презентирани се оригинални испитни постапки, базирани на познати услови кои

се јавуваат на некое конкретно мерно место или на акумулирано искуство на авторите [32-39]. Појдовна точка за повеќето автори е неможноста за репродукција на сите можни изобличувања на кои е изложен еден инструмент во текот на неговиот експлоатациски век, во рамките на една лабораториско – контролирана испитна постапка. Според тоа, голем дел од направените истражувања се презентирани во насока на квантитативно одредување на грешките кај мерните уреди, при промена на различни параметри на испитните сигнали, како што се: вкупно хармониско изобличување [30], амплитуда на испитните напони и струи во однос на номиналните параметри [22], времетраење на изобличувањата [34], фазен агол помеѓу фундаменталните компоненти [12], итн. Во доменот на тестирање инструменти за мерење реактивна моќност/енергија, интензитетот на отстапувањата дополнително е анализиран во однос на усогласеноста на мерните алгоритми помеѓу испитуваниот и референтниот уред [52-56].

Целите на оваа докторска дисертација се поставени во насока на експериментално одредување на одзивот кај различни типови инструменти за мерење електрична моќност и/или енергија во строго контролирани, несинусни услови. Анализата ќе биде спроведена со помош на квантитативни и квалитативни методи, за да се утврдат интензитетот и причините за грешка кај овие уреди. Строго контролираните услови, подразбираат континуирана промена на поединечни параметри на испитните сигнали, со цел приказ на грешките на инструментите во функција од повеќе различни влијателни фактори. На овој начин би се надополниле постоечките истражувања со оригинални испитни процедури, кои вклучуваат виши хармоници од различен ред, со различна амплитуда, т.е. удел во сигналите, и со различно фазно поместување во однос на фундаменталните напони и струи. Од анализата на добиените мерни резултати би можела да се направи споредба помеѓу големината на грешките кај овие уреди во синусен и несинусен работен режим. Преку промена на хармониските и фундаменталните параметри на испитните сигнали, би се прикажала промената на одзивот на инструментите во функција од различни влијателни фактори, а потоа би се исцртале и криви на грешка, кои соодветствуваат на промена на некој конкретен влезен параметер. Од добиените криви на грешка, со помош на математичко моделирање, би можела да се направи јасна дистинкција помеѓу отстапувањата кои се резултат на недостатоците на имплементираниот алгоритам за мерење моќност/енергија во хармониски – изобличени услови, и грешките кои се резултат на други влијателни фактори. Кај инструментите за мерење реактивна моќност/енергија, интензитетот и варијациите на грешките во функцијата од вредноста на поединечните параметри на испитните сигнали, можат дополнително да се анализираат и во однос на усвоената дефиниција за реактивна моќност. На тој начин, експериментално, би можел да се одреди и имплементираниот алгоритам за мерење кој, како што беше претходно нагласено, вообичаено не е експлицитно наведен од страна на производителот. Експерименталната анализа на одзивот на еден уред, не може да се комплетира без приказ на мерната неодреденост. Поради тоа, во завршниот дел од изложувањето, ќе биде предложен оригинален математички модел за приказ на буцетот на мерна неодреденост, за конкретниот тип мерења, кој би требало да ги обедини сите потенцијални влијателни фактори во мерниот процес. Промената на мерната неодреденост, во функција од варијации кај поединечните параметри на сигналите, ќе биде практично валидирана со користење мерна инструментација од највисока класа на точност.

1.3. Очекуван придонес од истражувањето и понатамошна примена на резултатите

Придонесот на овој докторски труд во конкретната научна област, се очекува да биде примарно ориентиран кон надополнување на постоечките истражувања во доменот на воспоставување стандарднизирани испитни протоколи за калибрација и верификација на инструменти за мерење електрична моќност/енергија, со несинусни тест сигнали. Особено применливи се очекува да бидат заклучоците кои произлегуваат од испитувањето уреди за мерење реактивна моќност и/или енергија, кои би можеле да послужат за соодветен избор на инструмент за целите на некоја идна мерна апликација. Од анализата на регистрираните отстапувања во однос на различните дефиниции за реактивна моќност, би можеле да се предвидат и грешките кај други инструменти, базирани на алтернативни принципи на мерење, во однос на несоодветно избраната референтна големина. Дополнително, врз база на интензитетот на грешките може да се одреди и непознатиот алгоритам за мерење, имплементиран во еден случајно избран инструмент за конкретната намена.

Од анализата на спроведените експериментални испитувања, би можеле да се извлечат заклучоци за интензитетот и природата на грешките кои се резултат на засебни влијателни фактори. Резултатите од било каква идна рутинска постапка, базирана на протоколите предложени во овој труд, би можеле да содржат јасна дистинкција помеѓу грешките кои се резултат на имплементираниот мерен алгоритам и отстапувањата кои произлегуваат од влијанието на самите виши хармоници врз колата за прилагодување на мерните инструменти. Исто така, преку анализа на одзивот на еден инструмент, во однос на промената на различни параметри на фундаменталните компоненти и вишите хармоници од испитните сигнали, би можеле да се одредат понатамошни критични точки за испитување на мерната инструментација, кои би биле базирани, но не и ограничени, на предложените тест сигнали од постоечките стандарди. Математичкиот модел за приказ на мерната неодреденост може да послужи како основа за воспоставување ланец на метролошка следливост во доменот на калибрација на инструменти за мерење на конкретните електрични величини, во несинусни услови.

Заклучоците од овој труд ќе наидат на најголема примена во калибрациски и тест лаборатории, чијашто примарна дејност е испитување инструменти за електрични величини, во доменот на законската метрологија. Дополнително, резултатите од спроведените мерења можат да послужат и при воспоставување процедури за испитување инструменти кои немаат толку широка примена, но се се позастапени во секојдневната електротехничка пракса, како што се паметните броила и анализаторите за квалитет на електрична енергија.

1.4. Структура на докторската дисертација

Работната верзија на докторската дисертација е организирана во осум поглавја.

Првото поглавје го претставува воведното изложување, во кое се наведени досегашните постигнувања во конкретната научна област, целите и очекуваната примена на резултатите од докторскиот труд. Во првиот дел од воведот, направен е преглед на литературата, од аспект на постоечки стандарди, препораки и законска регулатива во доменот на испитување уреди за мерење електрична моќност и/или енергија во несинусни услови, заедно со приказ

на досегашни научни публикации, кои се релевантни за конкретната проблематика. Во продолжение, накусо се прикажани целите и текот на истражувањето, преку можностите за надополнување на постоечките достигнувања во областа, а на самиот крај претставен е и потенцијалот за понатамошна примена на добиените резултати.

Во второто поглавје ќе биде изложен математичкиот апарат за анализа на вишите хармоници и тоа: приказот на изобличените сигнали во временски домен врз база на Фуриеови редови, начинот на претставување релативен удел на хармониците во однос на фундаменталните напони и струи, пресметката на фазните агли помеѓу вишите хармоници и компонентите со фреквенција од 50 Hz, како и методите за евалуација на различните компоненти на електрична моќност. Особено внимание ќе биде посветено на алтернативните пристапи за пресметка на реактивната и привидната моќност, базирани на различно толкување и различни дефиниции за конкретните величини. На самиот крај од ова поглавје ќе биде разгледан начинот на пресметка на факторот на моќност и неговото физичко толкување во случај на хармониски – изобличени напони и струи.

Третото поглавје ќе биде посветено на мерната опрема и лабораториските услови во кои се реализирани практичните испитувања. Најпрво, теоретски ќе биде изложен мерниот принцип на три различни генерации броила: индукциски, електронски и дигитални; и нивната соодветност за конкретната примена. Во продолжение ќе бидат претставени референтните уреди, односно еталоните во посед на акредитирана лабораторија за калибрација на инструменти за електрични величини, кои ќе бидат применети за репродукција на испитните сигнали и нивно мерење со врвна метролошка точност. Од аспект на еталоните, ќе бидат прикажани интерфејсот, преку кој се реализира нагодувањето на хармониските изобличувања, и начинот на приказ на мерните резултати.

Четвртото поглавје се однесува на анализа на резултатите, добиени во рамки на првични истражувања. Во истото ќе бидат прикажани грешките, измерени при тестирање три броила за активна енергија, од различен тип, со напони и струи кои поседуваат случајно хармониско изобличување. Резултатите од конкретните мерења, треба да послужат како основа за детализирање испитен протокол кој ќе опфати строго контролирани хармониски – изобличени сигнали.

Во поглавјето број пет ќе бидат прикажани резултати од детална испитна постапка спроведена врз еталонско броило за активна енергија, која опфаќа строго контролирани напонски и струјни сигнали во кои фигурираат виши хармоници. Како почетна точка за воспоставување на испитниот протокол, ќе се искористат тест сигналите наведени во стандардот EN 50470-3:2006+A1:2018 [27]. Одзивот на броилото ќе се анализира низ пет тест процедури, во секоја од нив напонските и струјните сигнали поседуваат само по еден виш хармоник, покрај фундаменталните компоненти. Дополнително, само еден параметар на хармониците се менува, додека сите останати се одржуваат на константна вредност. Од мерните резултати, со математичко моделирање, се прикажуваат грешките кои се резултат на имплементираниот мерен алгоритам во броилото. За верификација на воспоставениот модел, ќе бидат употребени уште неколку комерцијални броила, а на крајот ќе бидат презентирани резултати од извршени мерења со примарниот еталон на лабораторијата. За разлика од броилата кои се тестирани со сигнали во кои фигурира само една хармониска компонента, примарниот еталон се испитува со напони и струи со случајно хармониско изобличување. На тој начин се постигнува потполна верификација за начинот на приказ на активната електрична моќност и/или енергија, со инструменти базирани на дигитално процесирање сигнали, во ситуација на случајни изобличувања на влезните напони и струи.

Шестото поглавје се однесува на анализа на одзивот на броило за реактивна енергија, во строго контролирани хармониски услови, преку усвојување различни дефиниции за референтната реактивна моќност. Во отсуство на стандардизирана постапка за испитување броила за реактивна енергија, како појдовна точка ќе бидат повторно искористени тест сигналите наведени во стандардот EN 50470-3:2006+A1:2018 [27], кои се користат за испитување мерила за активна енергија. Покажувањето на испитуваниот уред ќе се спореди со референтната фундаментална реактивна моќност/енергија, како и со референтни вредности за приложената моќност, пресметани согласно дефинициите на Budeanu [13] и Fryze [14], при идентично изобличување на сигналите. Од мерните резултати, може да одреди имплементираниот мерен алгоритам во тестираниот уред (кој не e a priori познат) и квантитативно да се отсликаат неговите отстапувања во однос на различните пристапи за евалуација на референтната големина. За да се постигне општа прифатеност, во експерименталната анализа ќе биде повторно применет и примарниот еталон на лабораторијата, за кој алгоритамот на мерење е однапред познат. На крајот од ова изложување ќе биде прикажан математички модел за приказ на грешките, доколку одзивот на еден инструмент се споредува со покажувањето на референтен уред, базиран на алтернативен мерен алгоритам.

Седмото поглавје се однесува на моделирање буџет на мерна неодреденост при мерење активна и реактивна моќност и/или енергија во случај на хармониски – изобличени напони и струи. За таа цел ќе бидат искористени насоките за евалуација на мерната неодреденост наведени во Публикацијата EA-4/02 [65], и *Упатството за изразување на мерна неодреденост* (англ. *Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM*) [66]. Заради приказ на резултатите на врвно метролошко ниво, верификацијата на математичкиот модел за приказ на мерната неодреденост, ќе се реализира преку практични мерења, спроведени со примарниот еталон на акредитираната лабораторија, во доменот на конкретните физички величини. Заклучоците кои произлегуваат од практичните мерења, ќе послужат како основа за симулација на промените на вкупната мерна неодреденост, при промена на вредноста на поединечни параметри од испитните сигнали.

Во последното, осмо, поглавје ќе бидат прикажани сумираните заклучоци од спроведените теоретски и практични истражувања, најважните поенти кои би наишле на понатамошна широка примена на резултатите од испитувањата, како и насоки за понатамошно делување и истражување.

2. МАТЕМАТИЧКИ ПРИКАЗ НА ВИШИТЕ ХАРМОНИЦИ

2.1. Општи формулации

Причините за појава на виши хармоници во напонските и струјните сигнали вообичаено се лоцирани на страната на потрошувачите на електрична енергија, иако нивното постоење може да биде резултат и на производствените капацитети, но и во самата преносна и дистрибутивна мрежа. Како примарен извор на виши хармоници се сметаат нелинеарните потрошувачи на електрична енергија, како што се [1-7, 11, 35-36]:

- електролачните печки,
- опремата за заварување и лемење,
- насочувачите на наизменичен во еднонасочен напон,
- транзисторски и тиристорски управуваните погони,
- осветлувањето базирано на јонизација (неонски светла) и полупроводнички елементи (LED светилки), итн.

Во доменот на производствените капацитети, извор на хармоници може да претставуваат фотоволтаичните централи [7], додека во доменот на пренос и дистрибуција на електрична енергија, компоненти со фреквенција поголема од 50 Hz може да се јават како резултат на заситување на магнентните кола на електричните трансформатори [1-2].

Нелинеарните потрошувачи на електрична енергија од мрежата повлекуваат струи кои поседуваат случаен бранов облик. Овие струи, независно од комплексноста на брановиот облик, со помош на Фуриеова анализа, можат да се разложат на низа синусни бранови облици со различна фреквенција. Струјниот сигнал, во временски домен, може да се прикаже согласно следниот израз [1-7]:

$$i(t) = I_{DC} + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{n} I_h \sin(h\omega t + \alpha_{ih}),$$
 (2.1)

каде што: I_{DC} е еднонасочна компонента на сигналот, I_h е ефективната вредност на струјниот хармоник од ред h, α_{ih} претставува негово почетно аголно поместување, n е редот на максималниот хармоник кој се зема во предвид при анализата, а ω е кружната фреквенција. Протекувањето хармониски – изобличена струја низ импедансата на системот, резултира со изобличување на мрежниот напон, кој може да се претстави со следната математичка формулација:

$$u(t) = U_{DC} + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{n} U_h \sin(h\omega t + \alpha_{uh}) , \qquad (2.2)$$

каде што U_{DC} е еднонасочна компонента во мрежниот напон, која по правило треба да биде еднаква на 0 V [7], U_h е ефективната вредност на $h^{\text{тиот}}$ хармоник, а α_{uh} претставува негово почетно аголно поместување. Вообичаено, во фреквенцискиот спектар на напонските и струјните сигнали, фигурираат само непарните виши хармоници, т.е. непарните целобројни мултипли на основната фреквенција, додека евентуалното присуство на парни хармоници е индикатор за некаков дефект во системот [1-2]. Заради поедноставена анализа, во понатамошната евалуација ќе бидат занемарени и еднонасочните компоненти, односно ќе се усвои дека U_{DC} и I_{DC} се еднакви на нула.

За приказ на вишите хармоници во наизменичните сигнали, вообичаено се применува анализа во фреквенциски домен. Од практичен интерес е да се познава уделот на вишите хармоници во трифазните напони и струи. Согласно стандардот EN 50160 [67], уделот на еден виш хармоник се претставува во релативен (процентуален) облик, во однос на компонентата на сигналот со фундаментална фреквенција:

$$u_{h,\%} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 , \qquad (2.3)$$

$$i_{h,\%} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100$$
, (2.4)

каде што U_h и I_h се ефективните вредности (или амплитудите) на вишите хармоници од ред h, во напонскиот, односно струјниот сигнал, а U_1 и I_1 се ефективните вредности (или амплитудите) на фундаменталните компоненти. Уделот на еден хармоник во сигналот се нарекува уште и индивидуално (поединечно) хармониско изобличување, IHD_{Uh} или IHD_{Ih} (англ. Individual Harmonic Distortion – IHD) [4, 6]. Ефективните вредности на изобличениот напон, односно струја, се пресметуваат како:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} u^{2}(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{n} U_{h}^{2}} = \sqrt{U_{1}^{2} + U_{\Sigma h}^{2}}, \qquad (2.5)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^{2}(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{n} I_{h}^{2}} = \sqrt{I_{1}^{2} + I_{\Sigma h}^{2}}, \qquad (2.6)$$

каде што T е периода на компонентата на сигналот со основна фреквенција, а воведените величини $U_{\Sigma h}$ и $I_{\Sigma h}$, се суми од ефективните вредности на вишите хармоници [7]:

$$U_{\Sigma h} = \sqrt{\sum_{h>1}^{n} U_h^2} , \qquad (2.7)$$

$$I_{\Sigma h} = \sqrt{\sum_{h>1}^{n} I_{h}^{2}} \,. \tag{2.8}$$

За квантитативно одредување на присуството на виши хармоници во сигналите, се користи параметарот наречен вкупно хармониско изобличување (англ. *Total Harmonic Distortion – THD*), кој се пресметува засебно за напонот, односно струјата [1-9]:

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^n U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100 = \frac{U_{\Sigma h}}{U_1} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{h>1}^n u_{h,\%}^2} , \qquad (2.9)$$

$$THD_{I} = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{n} I_{h}^{2}}{I_{1}^{2}}} \cdot 100 = \frac{I_{\Sigma h}}{I_{1}} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{h>1}^{n} i_{h,\%}^{2}}.$$
(2.10)

Доколку се познати вкупните хармониски изобличувања на напоните и струите, THD_U и THD_I , како и нивните ефективни вредности, U и I, со користење на изразите (2.5), (2.6), (2.9) и (2.10) може да се пресметаат ефективните вредности на фундаменталните компоненти:

$$U_{1} = \frac{U}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_{U}}{100}\right)^{2}}},$$
(2.11)

$$I_{1} = \frac{I}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_{I}}{100}\right)^{2}}},$$
(2.12)

кои понатаму можат да послужат за пресметка на ефективните вредности на вишите хармоници, U_h и I_h , при познат процентуален удел, $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$, равенки (2.3) и (2.4).

Покрај ефективните вредности на поединечните виши хармоници, за потребите на понатамошната анализа, потребно е да се изразат и фазните поместувања помеѓу напоните и струите со иста фреквенција. Фазниот агол на еден виш хармоник, вообичаено се изразува во однос на фазниот агол на фундаменталниот напон, односно струја, во моментот на минување низ нулата на поединечните компоненти на сигналот, при почетокот на позитивната полупериода:

$$\theta_{uh} = \measuredangle(\alpha_{uh}, \alpha_{u1}), \qquad (2.13)$$

$$\theta_{ih} = \measuredangle(\alpha_{ih}, \alpha_{i1}), \qquad (2.14)$$

каде што фазните агли α_{uh} , α_{u1} , α_{ih} и α_{i1} се дефинирани во равенките (2.1) и (2.2). Фазниот агол помеѓу напонскиот и струјниот хармоник од $h^{\text{ти}}$ ред, U_h и I_h , се пресметува како [68]:

$$\varphi_h = h\varphi_1 + (\theta_{ih} - \theta_{uh}), \qquad (2.15)$$

каде што φ_1 е фазното поместување помеѓу фундаменталните напон и струја, U_1 и I_1 :

$$\varphi_1 = \measuredangle(\alpha_{i1}, \alpha_{u1}) \,. \tag{2.16}$$

Во изразот (2.15) фундаменталниот фазен агол, φ_1 , се множи со редот на хармоникот, h, поради фактот што фазорите на вишите хармоници ротираат со h пати поголема фреквенција во однос на фазорите на фундаменталните напони и струи [68].

2.2. Активна моќност при хармониски – изобличени напони и струи

Пресметката на активната моќност во еден систем во кој напоните и струите поседуваат хармониски – изобличен бранов облик, може да се реализира поаѓајќи од познатите релации кои се валидни и во синусни услови. Активната моќност претставува дел од вкупната моќност која може да се искористи за извршување некоја конкретна работа, т.е. моќноста која може, од страна на електричните потрошувачи, да се преобрази во некој друг корисен облик на енергија. Во монофазен систем, активната моќност, при хармониски – изобличени напон и струја, се пресметува како средна вредност на моменталната моќност, усреднета за временски интервал од една периода, која одговара на компонентите со фундаментална фреквенција [4, 7, 9, 11]:

$$P_f = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \sum_{h=1}^n U_h I_h \cos \varphi_h = P_{1,f} + \sum_{h>1}^n P_{h,f} , \qquad (2.17)$$

и истата всушност претставува аритметичка сума на активните моќности, кои произлегуваат од компонентите на сигналите со различна фреквенција. Во равенката (2.17), $P_{1,f}$ ја претставува фундаменталната активна моќност, додека со $P_{h,f}$ се означени активните моќности кои се резултат на вишите хармоници од ред *h*. Останатите величини во изразот (2.17) го поседуваат истото значење како во равенките (2.1), (2.2) и (2.15). Во трифазен систем, активната моќност, во општ случај, се пресметува како збир од активните моќности во трите фази:

$$P_{3f} = P_{fA} + P_{fB} + P_{fC} = \sum_{h=1}^{n} P_{h,fA} + \sum_{h=1}^{n} P_{h,fB} + \sum_{h=1}^{n} P_{h,fC} , \qquad (2.18)$$

а доколку системот е симетричен, равенката (2.18) преминува во:

$$P_{3f} = 3\left(P_{1,f} + \sum_{h>1}^{n} P_{h,f}\right) = 3\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \cos\varphi_h \,. \tag{2.19}$$

Треба да се напомене дека трифазен симетричен систем, при хармониски – изобличени сигнали, е оној систем во кој се детектираат виши хармоници од ист ред, со идентични амплитуди и фазни поместувања, во напоните, односно струите, од сите три фази [7].

2.3. Реактивна моќност при хармониски – изобличени напони и струи

Како што беше напоменато во воведното изложување, реактивната моќност не е еднозначно дефинирана физичка величина во случај кога напоните и струите, покрај компонентите со фреквенција од 50 Hz, во својот спектар поседуваат и виши хармоници. Една од првите теории за приказ на реактивна моќност во хармониски – изобличени услови, е предложена од страна на *Budeanu* [13]. Според оваа теорија, вкупната реактивна моќност, по фаза, е аритметички збир од реактивните моќности кои произлегуваат од напоните и струите со различни фреквенции:

$$Q_{B,f} = \sum_{h=1}^{n} U_h I_h \sin \varphi_h = Q_{1,f} + \sum_{h>1}^{n} Q_{h,f} .$$
(2.20)

Во изразот (2.20) $Q_{1,f}$ ја претставува фундаменталната реактивна моќност, додека со $Q_{h,f}$ се прикажани компонентите на моќност кои произлегуваат од напоните и струите со фреквенција *h* пати поголема од 50 Hz. Во општ случај, трифазната реактивна моќност, согласно дефиницијата на *Budeanu* [13], е збир од моќностите во трите фази:

$$Q_{B,3f} = Q_{B,fA} + Q_{B,fB} + Q_{B,fC} = \sum_{h=1}^{n} Q_{h,fA} + \sum_{h=1}^{n} Q_{h,fB} + \sum_{h=1}^{n} Q_{h,fC} , \qquad (2.21)$$

а доколку системот е симетричен, трифазната моќност е еднаква на:

$$Q_{B,3f} = 3\left(Q_{1,f} + \sum_{h>1}^{n} Q_{h,f}\right) = 3\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \sin\varphi_h \,. \tag{2.22}$$

Дефиницијата на *Budeanu* [13], претставува принцип на пресметка во фреквенциски домен, имајќи предвид дека вкупната моќност може да се разложи на поединечни компоненти кои произлегуваат од идеални синусни сигнали со различна фреквенција [52]. Од аспект на компензација, оваа моќност може да се анулира со примена на кондензаторски батерии [8].

Основните недостатоци на теоријата на *Budeanu* [13] се поврзани со неусогласеноста на изразите (2.20)-(2.22) со поимот реактивна моќност, валиден за синусни сигнални услови. Имено, познато е дека реактивната моќност е компонента на вкупно расположливата моќност во системот која треба да го задоволи триаголникот на моќности [7, 52]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$
, (2.23)

услов, кој при хармониски изобличувања, во општ случај, не е исполнет доколку се усвои $Q=Q_B$. Дополнително, компензација на компонентата од вкупната моќност, пресметана согласно изразите (2.20)-(2.22), не придонесува за постигнување фактор на моќност еднаков на 1 [3], поради постоењето на дополнителна компонента на моќност, наречена моќност на дисторзија, *D*. Физичкото толкување и математичкиот израз за пресметка на оваа компонента на моќност ќе бидат прикажани во понатамошниот дел од докторскиот труд.

Втората дефиниција за реактивна моќност, која ќе биде применета во практичната анализа од докторската дисертација, е базирана на теоријата на *Fryze* [14]. Според оваа теорија, струјниот сигнал кој поседува виши хармоници, може да се разложи на две компоненти:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t)$$
, (2.24)

каде што $i_a(t)$ претставува компонента на вкупната фазна струја i(t), равенка (2.1), која поседува ист бранов облик како и напонскиот сигнал u(t), равенка (2.2), и е во фаза со него. Оваа компонента на хармониски – изобличениот струен сигнал може да се изрази преку активната моќност [9]:

$$i_a(t) = \frac{P_f}{U^2} u(t) , \qquad (2.25)$$

каде што P_f е активната моќност пресметана согласно изразот (2.17), а U е ефективната вредност на напонот, равенка (2.5). Компонентата на струјата означена како $i_r(t)$ е остатокот од струјата i(t) и истата е фазно поместена во однос на напонскиот сигнал за 90°.

Компонентата на струјниот сигнал i(t) која е во фаза со напонот u(t) е наречена "активна" струја, $i_a(t)$, додека остаточната компонента е наречена "не-активна" или "реактивна" струја, $i_r(t)$. Теоријата на реактивна моќност предложена од страна на *Fryze* [14], претставува принцип на пресметка во временски домен, бидејќи истата е базирана на разложување на моменталната вредност на струјниот сигнал [52]. Реактивната моќност, согласно конкретната дефиниција, може да се пресмета според следниот израз [9, 46, 52]:

$$Q_{F,f} = N_f = UI_R , \qquad (2.26)$$

каде што U е ефективната вредност на напонскиот сигнал, а I_R е ефективната вредност на реактивната компонента на струјата, $i_r(t)$. Во изразот (2.26), ознаката N_f се однесува на алтернативна формулација на реактивната моќност, пресметана согласно теоријата на *Fryze* [14], според која истата се нарекува уште и "не-активна" или "фиктивна" моќност [46, 57].

Недостатоците на теоријата на *Budeanu* [13], кои се однесуваат на неможноста за постигнување единечен фактор на моќност при анулирање на реактивната компонента и неусогласеноста на оваа дефиниција со триаголникот на моќности, кој е валиден за синусни услови, се надминати со воведување на теоријата на *Fryze* [14]. Од друга страна, реактивната моќност пресметана согласно овој пристап не може да се компензира со употреба на пасивни компоненти (пр. кондензаторски батерии) [8], бидејќи во истата фигурираат моќности кои се резултат на меѓусебната интерференција помеѓу компонентите на сигналите со различни фреквенции.

Неусогласеноста помеѓу двете основни дефиниции за реактивна моќност во хармониски – изобличени услови, и принципите кои важат во синусен работен режим, довеле до нивно надоградување и прилагодување со теории, предложени од страна на повеќе автори: *Kusters* – *Moore, Shepard* – *Zakikhani, Sharon, Czarnecki* [8-9, 15-18] итн. Поради обемност на проблематиката, овие дефиниции за приказ на реактивната моќност нема да бидат претставени во понатамошното изложување. Она што ќе биде изложено, со цел постигнување еднозначност и усогласеност во приказот на електричните величини при несинусни напони и струи, се заклучоците од *Работната група за несинусни услови* на IEEE

[69], кои подоцна се пренесени во стандардот IEEE 1459 [51]. Според овие заклучоци, величините кои се од интерес за мерење и практична анализа, во несинусни услови, се фундаменталните компоненти на моќност, меѓусебно корелирани преку триаголникот на моќности, валиден за синусен работен режим. Согласно стандардот IEEE 1459 [51], реактивната моќност, по фаза, која е од интерес за мерење и анализа изнесува:

$$Q_{1,f} = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \,. \tag{2.27}$$

Трифазната фундаментална моќност е збир од моќностите кои произлегуваат од фундаменталните напони и струи од сите три фази:

$$Q_{1,3f} = Q_{1,fA} + Q_{1,fB} + Q_{1,fC} , \qquad (2.28)$$

додека во симетрични услови истата изнесува:

$$Q_{1,3f} = 3Q_{1,f} = 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 \,. \tag{2.29}$$

2.4. Привидна моќност и фактор на моќност при хармониски – изобличени напони и струи

Привидната моќност, при хармониски – изобличени напони и струи може да се пресмета согласно три алтернативни пристапи. За приказ на првите два начина се поаѓа од заклучоците кои произлегуваат од теоријата на *Budeanu* [13] и истите се познати како аритметички, односно векторски, принцип за пресметка на привидна моќност [7]. Третиот начин на пресметка, поаѓа од заклучоците [69], презентирани во стандардот IEEE 1459 [51], а така добиената величина се нарекува ефективна привидна моќност. Согласно аритметичкиот пристап, привидната моќност, по фаза, може да се изрази како [7]:

$$S_f^A = \sqrt{P_f^2 + Q_{B,f}^2 + D_f^2} , \qquad (2.30)$$

каде што P_f и $Q_{B,f}$ се активната моќност и реактивната моќност, евалуирана согласно теоријата на *Budeanu* [13], соодветно, по фаза, пресметани со примена на равенките (2.17) и (2.20). Компонентата D_f е т.н. моќност на дисторзија, која нема физичко значење и која е резултат на интерференција помеѓу напонските и струјните хармоници со различна фреквенција [4, 7-11]. Оваа компонента во изразот (2.30) се пресметува како [70]:

$$D_f = \sqrt{\sum_{k \neq i}^n [U_k^2 I_i^2 + U_i^2 I_k^2 - 2U_k I_k U_i I_i \cos(\varphi_k - \varphi_i)]}, \qquad (2.31)$$

каде што U_k , U_i , I_k и I_i , се ефективните вредности на напонските и струјните хармоници, а φ_k и φ_i се фазните агли помеѓу напоните и струите од ред k, односно i.

Трифазната привидна моќност, согласно аритметичкиот пристап, се пресметува како збир од привидните моќности во поединечните фази [7]:

$$S_{3f}^{A} = S_{fA}^{A} + S_{fB}^{A} + S_{fC}^{A} , \qquad (2.32)$$

а доколку системот е во полна симетрија:

$$S_{3f}^{A} = 3S_{f}^{A} = 3\sqrt{P_{f}^{2} + Q_{B,f}^{2} + D_{f}^{2}}.$$
(2.33)

Векторскиот пристап за пресметка на привидната моќност поаѓа од равенките (2.18) и (2.21), според кои се изразени трифазните активна и реактивна моќност, согласно теоријата на *Budeanu* [13], во општ случај. Идентична е и појдовната точка за пресметка на трифазната моќност на дисторзија:

$$D_{3f} = D_{fA} + D_{fB} + D_{fC} , (2.34)$$

каде што соодветните моќности во поединечните фази се пресметуваат според изразот (2.31). Трифазната привидна моќност е еднаква на:

$$S_{3f}^{V} = \sqrt{P_{3f}^2 + Q_{B,3f}^2 + D_{3f}^2} \,. \tag{2.35}$$

На Слика 2.1 графички се прикажани двата алтернативни начини за евалуација на привидната моќност, во општ случај, при несиметрични услови. Воочлива е разликата помеѓу трифазната привидна моќност, добиена согласно аритметичкиот и векторскиот пристап, и потребата од алтернативен начин на пресметка, кој ќе биде валиден за секое случајно изобличување на сигналите. Од друга страна, доколку постои потполна симетрија помеѓу трифазните напони и струи, т.е. ако P_{3f} и $Q_{B,3f}$ се пресметани со помош на изразите (2.19) и (2.22), трифазната привидна моќност, добиена согласно векторскиот пристап за пресметка, ќе биде еднаква по вредност со трифазната привидна моќност, пресметана според равенката (2.33), валидна согласно аритметичкиот пристап за пресметка:

$$S_{3f}^{V} = \sqrt{\left(3P_{f}\right)^{2} + \left(3Q_{B,f}\right)^{2} + \left(3D_{f}\right)^{2}}.$$
(2.36)

Ефективниот пристап за пресметка на привидната моќност, кој е предложен во стандардот IEEE 1459 [51], поаѓа од ефективните вредности на напоните и струите. Привидната моќност, по фаза, согласно равенките (2.5) и (2.6) изнесува:

$$S_{f}^{E} = UI = \sqrt{\sum_{h=1}^{n} U_{h}^{2}} \sqrt{\sum_{h=1}^{n} I_{h}^{2}} .$$
(2.37)

Вкупната моќност, пресметана според равенката (2.37), може да се разложи на поединечни компоненти, кои произлегуваат од фундаменталните напон и струја, односно од вишите хармоници на сигналите:





Слика 2.1 Аритметички и векторски пристап за пресметка на привидната моќност во хармониски – изобличени услови

$$\left(S_f^E\right)^2 = (UI)^2 = (U_1I_1)^2 + (U_1I_{\Sigma h})^2 + (U_{\Sigma h}I_1)^2 + (U_{\Sigma h}I_{\Sigma h})^2 = = S_1^2 + S_h^2 .$$
(2.38)

каде што S_1 е фундаменталната привидна моќност, која произлегува од компонентите на сигналите со фреквенција од 50 Hz, а S_h е т.н. нефундаментална привидна моќност која се состои од три компоненти [7, 46]:

$$S_h = \sqrt{D_{lh}^2 + D_{Uh}^2 + S_{\Sigma h}^2} \,. \tag{2.39}$$

каде што: $D_{Ih}=U_1I_{\Sigma h}$ е моќност на струјна дисторзија, $D_{Uh}=U_{\Sigma h}I_1$ е моќност на напонска дисторзија, а $S_{\Sigma h}=U_{\Sigma h}I_{\Sigma h}$ е вкупна моќност на вишите хармоници. D_{Ih} и D_{Uh} се компоненти на нефундаменталната привидна моќност кои ја прикажуваат интерференцијата помеѓу фундаменталните компоненти и вишите харамоници. Вкупната моќност на вишите хармоници, $S_{\Sigma h}$, може да се разложи дополнително, на хармониска ефективна моќност и хармониска моќност на дисторзија:

$$S_{\Sigma h} = \sqrt{S_{Eh}^2 + D_{\Sigma h}^2} \,. \tag{2.40}$$

каде што хармониската ефективна моќност, S_{Eh} , се состои од производите на вишите хармоници на напонот и струјата од ист ред и во истата се содржат активната и реактивната моќност од компонентите на сигналите со различни фреквенции. Хармониската моќност на дисторзија, $D_{\Sigma h}$, се состои од производите на напонските и струјните виши хармоници од различен ред [46].

Во трифазен систем, вкупната привидна моќност е сума од привидните моќности во трите фази:

$$S_{3f}^{E} = U_{A}I_{A} + U_{B}I_{B} + U_{C}I_{C} , \qquad (2.41)$$

а доколку системот е симетричен, изразот (2.41) преминува во:

$$S_{3f}^{E} = 3UI = 3\sqrt{\sum_{h=1}^{n} U_{h}^{2}} \sqrt{\sum_{h=1}^{n} I_{h}^{2}}.$$
(2.42)

Во синусен работен режим, факторот на моќност (англ. power factor – PF) го претставува односот помеѓу активната и привидната моќност во еден систем, т.е. го прикажува релативниот удел на енергијата која ја користат потрошувачите за понатамошна преобразба во однос на вкупната енергија која е на располагање во системот. Факторот на моќност, како што е добро познато, се пресметува како косинус од фазниот агол помеѓу напонот и струјата. Во случај на хармониски – изобличени напони и струи, факторот на моќност не може да се пресмета на овој начин, бидејќи напонскиот и струјниот сигнал не поседуваат

јасно – дефинирано фазно поместување. Поради таа цел се воведува терминот "вистински фактор на моќност" (англ. true power factor – PF_T), кој, за трифазен симетричен систем, се пресметува како [1, 4, 7]:

$$PF_{T} = \frac{P_{3f}}{S_{3f}} = \frac{P_{3f}}{3U_{1}I_{1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_{U}}{100}\right)^{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_{I}}{100}\right)^{2}}},$$
(2.43)

каде што сите поединечни ознаки се претходно објаснети. Доколку системот е несиметричен, во равенката (2.43), на местото на привидната моќност треба да се замени ефективната привидна моќност, $S_{3f} = S_{3f}^E$, имајќи предвид дека истата поседува најголема вредност во однос на другите две формулации, т.е. нејзиното вклучување ќе резултира со најмал фактор на моќност [7]. Во случај кога се работи за потполно симетричен систем, трите пристапи за пресметка на привидна моќност, ќе резултираат со идентична вредност за PF_T . Во равенката (2.43) може да се применат одредени апроксимации, со цел нејзина корелација со терминологијата, валидна во синусни сигнални услови. Имено, доколку импедансата на системот е доволно мала, напонското изобличување ќе биде занемарливо, колку и да е значително изобличувањето на струјните сигнали [1]. Во тој случај, може да се усвои дека трифазната активна моќност е приближно еднаква на трифазната фундаментална активна моќност, т.е. $P_{3f} \approx 3P_{1,f}$, и дека $THD_U \approx 0$, па изразот (2.43) преминува во:

$$PF_T \approx \frac{3P_{1,f}}{3U_1 I_1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = \cos \varphi_1 \cdot PF_D , \qquad (2.44)$$

каде што $cos \varphi_1$ е фундаменталниот фактор на моќност или фактор на моќност заради аголно поместување (англ. displacement power factor), а PF_D е факторот на моќност поради хармониското изобличување (англ. distortion power factor) [1, 4]. Согласно, стандардот IEEE 1459 [51], при хармониски – изобличени услови, од интерес се моќностите кои произлегуваат од фундаменталните компоненти на сигналите, па оттука факторот на моќност заради аголно поместување останува важен индикатор за реално – употребливата моќност во системот. Овој параметар, заедно со фазните агли помеѓу вишите хармоници од ред h, φ_h , ќе наидат на практична примена во понатамошниот дел од трудот, заради одредување мерни точки во кои ќе биде спроведено испитувњето на мерната инструментација.

3. ПРЕГЛЕД НА МЕРНАТА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА

Во третото поглавје од докторската дисертација е претставена мерната инструментација која се употребува во текот на практичните испитувања. На почетокот од конкретното изложување, прикажан е принципот на работа на различни уреди за мерење електрична моќност и/или енергија. Принципот на работа на поединечни инструменти е примарно претставен од перспектива на мерење активна моќност/енергија, додека потребните модефикации за регистрирање на реактивната моќност/енергија следат во продолжение. Врз база на документираниот мерен принцип, даден е првичен коментар за адекватноста на конкретните решенија во доменот на мерење на наведените електрични величини, при хармониски – изобличени напони и струи. Вториот дел од ова поглавје е посветен на еталоните, во сопственост на акредитирана лабораторија за калибрација на мерила за електрични величини, со кои се реализира практичниот дел од докторскиот труд. Истите се применуваат за репродукција на изобличените сигнали и верификација на спроведените мерења со врвно ниво на точност.

3.1. Принцип на работа на различни уреди за мерење електрична моќност/енергија

Најголемиот дел практични испитувања, опфатени во рамки на докторската дисертација, се спроведени врз броила за активна и реактивна енергија, како најраспространети уреди во доменот на мерење на конкретните електрични величини. Принципите на мерење и нивната усогласеност со несинусните влезни сигнали, во конкретното потпоглавје, ќе бидат илустрирани токму од аспект на овие инструменти. Најголемиот дел од заклучоците, особено оние кои се однесуваат на последната генерација, дигитални инструменти, на кои ќе биде посветено најголемо внимание во понатамошниот текст, се валидни и во доменот на мерење електрична моќност.

Наведените стандарди и препораки [25-28, 47-50], како и цитираните научни истражувања [10-12, 21-24, 29-40, 52-59], опфаќаат барања и бројни примери од испитување најразлични типови броила за мерење активна и/или реактивна енергија во несинусни услови. Во дел од цитираната литература, анализата на одзивот на мерилата е спроведена токму од аспект на мерниот алгоритам, имплементиран во самите уреди [11-12, 30-31, 52-56].

3.1.1. Индукциски (електромеханички) броила

Најстарата генерација инструменти за мерење активна енергија, кои сеуште наоѓаат широка примена во бројни земји од светот, ја сочинуваат индукциските броила. Станува збор за електромеханични уреди, кои поради својата конструкција, се одликуваат со голема стабилност во широк опсег на оптоварувања и амбиентални услови [71-73]. Достапни се во монофазна и трифазна изведба. На Слика 3.1 илустриран е принципот на работа на едно монофазно индукциско броило. Трифазните уреди, иако конструктивно поразлични од монофазните, функционираат на идентичен принцип.


Слика 3.1 Шематски приказ на индукциско броило

Индукциските броила се состојат од статичен и подвижен дел. Статичниот дел, кај монофазните уреди, го сочинуваат два електромагнети, кои претставуваат калеми со челично јадро, и перманентен магнет со механизам за кочење, кој служи за регулација на брзината на ротација на подвижниот дел од броилото, т.е. алуминиумскиот диск [71-73]. Првиот калем е предвиден за паралелно поврзување во мерното коло и истиот се состои од голем број навивки со мал напречен пресек. На краевите од овој калем е поврзан напонот на мерниот систем, u(t), а низ навивките протекува струја, $i_u(t)$, која е пропорционална на тој напон и е фазно поместена за речиси 90° во однос на истиот, поради доминантно индуктивниот карактер на самата намотка. Втората намотка се состои од неколку навивки со голем напречен пресек и истата се поврзува во серија со потрошувачот чијашто енергија е предмет на мерење, т.е. низ истата протекува мерената струја, i(t). Поради протекување струја во намотките, низ алуминиумскиот диск на броилото минуваат наизменични магнетни флуксеви, пропорционални на овие две струи. Овие два магнентни флуксеви индуцираат електромоторни сили во дискот, кои пак резултираат со протекување виорни струи, низ него. Течењето на виорните струи е ограничено од импедансата на самиот диск, која има доминантно активен карактер. Поради интеракција помеѓу флуксот, пропорционален на мерениот напон, и виорната струја, пропорционална на струјата која протекува низ струјната намотка, се создава електромагнетен момент, M_1 . Последователно, електромагнетен момент M_2 , се развива како резултат на меѓусебната интеракција помеѓу флуксот, пропорционален на мерената струја, и виорната струја, пропорционална на приклучениот напон. Резултантниот електромагнетен момент, се пресметува како разлика на M_1 и M_2 [72] и истиот математички може да се евалуира со следнава релација:

$$M = KUI \sin(90^\circ - \varphi) = KUI \cos \varphi = KP, \qquad (3.1)$$

која прикажува дека истиот е пропорционален на мерената активната моќност P, преку коефициентот на пропорционалност K. Во равенката (3.1), U и I се ефективните вредности на приклучениот напон, односно струја, а φ е фазниот агол помеѓу нив.

Во цитираната литература [11, 32], прикажани се експериментално верификувани математички модели, усвоени за илустрација на одзивот на едно индукциско броило, при несинусни влезни сигнали. Во [11] е наведено дека, одзивот на еден инструмент при хармониски – изобличени напони и струи може да се апроксимира со равенката:

$$W = \left[P_1 \pm \sum_{h>1}^{n} P_h (1+\gamma_h) \right] t , \qquad (3.2)$$

каде што P_1 и P_h се фундаменталната активна моќност и активната моќност на вишите хармоници од ред h, соодветно, а γ_h е т.н. фреквенциски одзив на броилото:

$$\gamma_h = 1,28(e^{-1,19h} - 1), \qquad (3.3)$$

кој се добива по емпириски пат. Алтернативен пристап за одредување одзив на индукциско броило во несинусни услови е презентиран во [32]. Според авторите на оваа публикација, коефициентот на пропорционалност K, помеѓу мерената активна моќност P, и резултантниот електромагнетен момент M, од равенката (3.1), не е константен, туку истиот зависи од ефективните вредности на напонот, U, и струјата, I, како и од кружната фреквенција на сигналите, ω , равенки (2.1) и (2.2). За приказ на отстапувањата на броилата е предложен следниот израз:

$$\delta_{\Sigma} = \left[\sum_{h>1}^{n} (K_h - 1)\delta_h\right] \cdot 100, \qquad (3.4)$$

каде што K_h е вредност на коефициентот на пропорционалност за хармониските компоненти од ред h, а δ_h е т.н. хармониски фактор на грешка. Овие две големини се пресметуваат согласно емпириски изведени изрази, во кои фигурираат податоци од конструктивен карактер за еден мерен уред. Бидејќи индукциските броила нема да бидат детално анализирани во овој докторски труд, овие релации нема да бидат пошироко обработени.

Постоењето грешка во мерењето активна енергија со индукциско броило, при несинусни влезни сигнали, може да се продискутира и од аспект на брановите облици на флуксевите, индуцираните напони и виорните струи. Имено, флуксевите, кои се јавуваат како резултат на струите низ двата електромагнети, го следат брановиот облик на влезните сигнали и според тоа индуцираат електромоторни сили во кои, при несинусни влезни напони и струи, би фигурирале и виши хармоници. Следува дека и виорните струи кои циркулираат низ алуминиумскиот диск, во конкретниот случај би поседувале непростопериодичен бранов облик. Електромагнетните моменти M_1 и M_2 , нема да бидат предизвикани единствено од интеракцијата на флуксевите и виорните струи кои се должат на поединечните хармоници на напоните и струите, туку ќе поседуваат и компоненти кои се резултат на интеракцијата помеѓу вишите хармоници со различни фреквенции. Овие интеракции, како што беше наведено во претходното поглавје, не резултираат со компонента на моќност која има физичко значење во системот. Дополнителни грешки, би се јавиле и поради зголемените загуби во двата калема, кои се резултат на присуството на високофреквентни компоненти, како и загубите во алуминиумскиот диск, кај кој, при фреквенции различни од 50 Hz, резултантната импеданса нема да поседува доминантно активен карактер.

3.1.2. Електронски броила

Втората генерација мерила за активна енергија, се таканаречените електронски броила, базирани на аналогно множење на мерените напони и струи и нивна преобразба во напонски сигнал, пропорционален на активната моќност во системот. Резултантниот напон понатаму се обработува по дигитален пат. Постарите изведби на овие уреди поседуваат блок за множење, базиран на импулсно – широчинска модулација, кај кои резултантниот сигнал претставува поворка импулси, чијашто амплитуда е пропорционална на мерениот напон, а чиешто времетраење е пропорционално на мерената струја [73-74]. Недостатокот на ова решение, во доменот на мерење моќност/енергија при хармониски – изобличени сигнали, е во неопходната претходна преобразба на влезните наизменични напони и струи, во еднонасочни сигнали. На тој начин изобличувањето на брановиот облик на мерениот напон, односно струја, не доспева до самиот множач. Кај посовремените решенија, овој недостаток е надминат со изведба на блокот за множење во интегрирана техника [73, 75]. Принципот на мерење кај едно електронско броило е илустриран на Слика 3.2.



Слика 3.2 Шематски приказ на електронско броило

Со помош на напонскиот и струјниот преобразувач, U/U и I/U, напонскиот и струјниот сигнал кои се предмет на мерење, u(t) и i(t), се преобразуваат во напони, $u_u(t)$ и $u_i(t)$, пропорционални на мерените величини. На излезот од блокот за множење се добива сигнал, чијашто моментална вредност е пропорционална со производот на влезните сигнали:

$$u_r(t) = u_u(t)u_i(t) = k_u u(t)k_i i(t),$$
(3.5)

каде што k_u и k_i се коефициенти на преобразба на преобразувачите U/U и I/U. Сигналот, $u_r(t)$ се доведува на влезот од интеграторот, а на неговиот излез се јавува напон:

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^T u_u(t) u_i(t) dt = -\frac{k_u k_i}{RC} \int_0^T u(t) i(t) dt = KP, \qquad (3.6)$$

кој е пропорционален на активната моќност во системот. Имајќи ја предвид усогласеноста на равенката (3.6) и изразот (2.17), за пресметка на активната моќност во несинусни услови, се очекува дека овие уреди верно ќе ја прикажат вкупната активна моќност/енергија во системот, со грешка која се должи единствено на влијанието на вишите хармоници врз колата за преобразба на влезните сигнали.

3.1.3. Дигитални броила

Последната генерација инструменти за мерење активна моќност/енергија, се базирани на дигитална обработка на сигнали (англ. Digital Signal Processing – DSP). Блок шемата на еден ваков уред е претставена на Слика 3.3.



Слика 3.3 Блок шема на дигитално броило за активна енергија

Напонот и струјата кои се предмет на мерење, u(t) и i(t), се преобразуваат, со помош на аналогните кола за прилагодување U/U и I/U, во напонски сигнали, $u_u(t)$ и $u_i(t)$, чиишто вредности се компатибилни со влезниот опсег на колата за аналогно – дигитална (АД) преобразба. На излезот од АД преобразувачите се добивааат дискретни вредности, $u_{u,j}$ и $u_{i,j}$, кои се репрезент на мерените големини. Бројот на вакви примероци во единица време зависи од брзината на земање одбироци на АД конверторот [73, 76-80]. Во решението илустрирано на Слика 3.3, примероците кои се репрезент на струјниот сигнал, $u_{i,j}$, се корегираат за варијациите во фазниот агол [79] и минуваат низ дигитален високопропусен филтер (ВПФ), пред блокот за дигитално множење со примероците кои се репрезент на мерениот напон, $u_{u,j}$. Дигиталниот репрезент на производот на мерените напон и струја, преку дигитален нископропусен филтер (НПФ), се доведува до блокот за преобразба на напон во фреквенција, каде се врши негово усреднување и преобразба во поворка импулси, пропорционални на мерената величина. Бројот на импулси се регистрира со бројач и се прикажува на индикаторскиот дел во единица мерка која одговара на мерената величина, додека поворката импулси се доведува на импулсниот излез, заради можност за приклучување референтна инструментација за контрола на спроведеното мерење. Работата на АД преобразувачите и колото за преобразба на напон во фреквенција се контролира преку генератор на тактни импулси.

Делот на АД преобразба на мерените сигнали, заедно со споменатите компоненти на инструментот кои служат за дигитална обработка на истите, се вообичаено изведени во интегрирана техника. За минимизација на грешките, потребено е АД преобразбата на напонскиот и струјниот сигнал да биде спроведена синхроно. Активната моќност, која ја регистрира еден уред, базиран на дигитална обработка на сигнали, може да се прикаже како:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{j=m}^{m+(N-1)} u_{u,j} \cdot u_{i,j} = k_u k_i \frac{1}{N} \sum_{j=m}^{m+(N-1)} u_j \cdot i_j , \qquad (3.7)$$

каде што N е бројот на примероци од сигналите, земени во рамките на еден т.н. "прозорец на усреднување", а со индекс m е обележан почетниот примерок во конкретниот прозорец, со кој започнува усреднувањето. Во изразот (3.7), k_u и k_i се коефициентите на преобразба на аналогните преобразувачи, а со u_j и i_j се означени соодветните вредности на примероците, прикажани од перспектива на величините кои се примарно предмет на мерење.

Од аспект на можностите за мерење хармониски – изобличени напони и струи, дополнителните барања за овие уреди, покрај потребата од синхронизација во работењето на АД преобразувачите, се однесуваат на фреквенцијата на земање одбироци. Имено, во случај на сигнали со синусен бранов облик, потребно е фреквенцијата на земање одбироци да биде два пати поголема од фреквенцијата на наизменичните сигнали. Во случај на хармониски – изобличени сигнали, неопходно е фреквенцијата на земање примероци да биде минимум два пати поголема од фреквенцијата на вишиот хармоник од највисок ред, кој фигурира во спектарот на мерените напони и струи.

3.1.4. Броила за реактивна енергија

За да може еден инструмент од било кој тип да се користи за мерење реактивна енергија, потребно е во истиот да фигурираат дополнителни кола за преобразба или да се примени алтернативен начин на поврзување во мерното коло. Постојат неколку пристапи кои се применуваат врз претходно претставените решенија за мерење активна моќност/енергија, за да се добие уред за мерење реактивна моќност/енергија, и истите се сведуваат на аналогна, или дигитална (микропроцесорска) обработка на мерените сигнали.

Кај индукциските броила, за да се измери реактивната енергија во системот, потребно е да се постигне конфигурација во која фазниот агол помеѓу флуксевите од напонскиот и струјниот калем ќе биде еднаков со фазниот агол помеѓу мерените напон и струја. Со други зборови, потребно е флуксот, кој е резултат на струјата која протекува низ напонската намотка, да заостанува зад мерениот напон за ист агол, за кој заостанува и вториот флукс, зад мерената струја. За да се постигне ова, сериски со напонската намотка се додава предотпорник, чијашто функција е да ги одржува напонот и струјата низ напонската намотка меѓусебно во фаза. Доколку за реализација на едно вакво броило се избере конструктивно решение кое ќе резултира со потиснување на вишите хармоници, т.е. доколку се постигне ситуација каде што уредот ја мери единствено фундаменталната енергија, тогаш истиот би бил во корелација со барањата на стандардот IEEE 1459 [51]. Кај повеќето модерни броила, било да станува збор за уреди со аналогна преобразба на мерената моќност во напонски сигнал (електронски броила) или за инструменти базирани на дигитално процесирање сигнали, мерењето реактивна моќност/енергија е реализирано преку фазно поместување на мерените напони или струи за 90°. Поместувањето на напоните или струите за 90° најчесто се реализира во текот на аналогната преобразба на сигналите, со употреба на операциски засилувач во конфигурација на интегратор, Слика 3.4.



Слика 3.4 Операциски засилувач во конфигурација на интегратор

Доколку мерениот напон, u(t), има синусен бранов облик, на излезот од интеграторот се добива сигнал, $u_o(t)$, фазно поместен за 90° во однос на u(t):

$$u_{o}(t) = -\frac{1}{RC} \int u(t)dt = -\frac{1}{RC} \int \sqrt{2}U \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}U}{RC\omega} \cos(\omega t) =$$

$$= \frac{\sqrt{2}U}{RC\omega} \sin(\omega t + 90^{\circ}), \qquad (3.8)$$

каде што вредностите на отпорникот и кондензаторот вообичаено се избираат така што RC=1 [74]. Доколку напонот на излез од интеграторот се помножи со мерената струја и се изврши усреднување на овој производ на временски интервал од една периода, се добива реактивната моќност во системот:

$$Q_{izm} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \omega i(t) u_{o}(t) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left\{ \omega \left[\sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi) \right] \left[\frac{\sqrt{2}U}{\omega} \sin(\omega t + 90^{\circ}) \right] \right\} dt = UI \sin \varphi$$
(3.9)

Доколку мерените сигнали, покрај фундаменталните компоненти поседуваат и виши хармоници, тогаш напонот на излез од интеграторот, $u_o(t)$, го поседува следниот облик:

$$u_{o}(t) = -\frac{1}{RC} \int u(t)dt = -\frac{1}{RC} \int \left[\sum_{h=1}^{n} \sqrt{2}U_{h} \sin(h\omega t + \alpha_{uh}) \right] dt =$$

$$= \frac{1}{RC} \sum_{h=1}^{n} \frac{\sqrt{2}U_{h}}{h\omega} \cos(h\omega t + \alpha_{uh}) = \frac{1}{RC} \sum_{h=1}^{n} \frac{\sqrt{2}U}{h\omega} \sin(h\omega t + \alpha_{uh} + 90^{\circ}), \qquad (3.10)$$

и како што може да се забележи од равенката (3.10), сите компоненти на сигналот фазно се поместуваат за 90°. Доколку овој напон се помножи со мерената струја, која исто така содржи виши хармоници, и производот се усредни на временски интервал од една периода, која одговара на сигналите со фундаментална фреквенција, се добива измерената реактивна моќност, која го поседува следниот облик [52-56]:

$$Q_{izm} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \omega i(t) u_{0}(t) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \omega \left[\sum_{h=1}^{n} \sqrt{2} I_{h} \sin(h\omega t + \alpha_{ih}) \right] \left[\sum_{h=1}^{n} \frac{\sqrt{2} U_{h}}{h\omega} \sin(h\omega t + \alpha_{uh} + 90^{\circ}) \right] dt =$$

$$= \sum_{h=1}^{n} \frac{U_{h} I_{h} \sin \varphi_{h}}{h} = Q_{1,f} + \sum_{h>1}^{n} \frac{Q_{h,f}}{h},$$
(3.11)

каде што сите поединечни ознаки се дефинирани во претходното поглавје од докторскиот труд. Од изразот (3.11) може да се заклучи дека, доколку кај еден инструмент е применето решение за аналогно поместување на мерениот напон (или струја) за 90°, при хармониски изобличени сигнали, ќе се мери фундаменталната реактивна моќност заедно со моќностите на компонентите кои произлегуваат од вишите хармоници, редуцирани за редот на конкретниот хармоник. Доколку сигналите имаат мало *THD*, измерената вредност ќе биде приближно еднаква на фундаменталната реактивна моќност.

Алтернативното решение кое се применува за мерење реактивна моќност/енергија е базирано на дигитално поместување на напонските (или струјните) сигнали за четвртина периода. Слично како и кај дигиталните уреди за мерење активна моќност/енергија, доколку *N* е вкупниот број примероци од мерените сигнали, земен во рамките на еден т.н. прозорец на усреднување, измерената реактивна моќност го добива следниот облик [52-56]:

$$Q_{izm} = \frac{1}{N} \sum_{j=m}^{m+(N-1)} u_{u,j} \cdot u_{i,j-(N/4)} = k_u k_i \frac{1}{N} \sum_{j=m}^{m+(N-1)} u_j \cdot i_{j-(N/4)} =$$

$$= \sum_{h=1}^n \pm U_h I_h \sin \varphi_h = \sum_{h=1}^n \pm Q_h ,$$
(3.12)

каде што знакот, + или –, пред компонентата на реактивна моќност, која произлегува од конкретен ред виши хармоници, зависи од самиот ред на хармоникот.

Кај инструментите базирани на дигитална обработка на сигнали, реактивната моќност/ енергија може да се измери и по индиректен пат, преку измерените активна и привидна моќност/енергија. Решението за мерење единствено на активната моќност/енергија е илустрирано на Слика 3.3. За да се мери и привидната моќност, потребно е решението прикажано на Слика 3.3 да се надополни со соодветни кола за мерење ефективни вредности на напоните и струите. Блок шемата на еден ваков инструмент е прикажана на Слика 3.5. Реактивната моќност се добива пресметковно, од триаголникот на моќности, валиден за синусен работен режим:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \,, \tag{3.13}$$

додека, согласно дискусијата претставена во второто поглавје од докторскиот труд, при несинусни сигнали, конкретното решение ќе резултира со приказ на т.н. неактивна моќност во системот.



Слика 3.5 Блок шема на дигитален инструмент за индиректно мерење реактивна моќност/енергија

3.2. Еталони за електрична моќност/енергија во Лабораторија за Електрични Мерења (ЛЕМ)

Практичниот дел од докторската дисертација, од аспект на испитување одзив на различни уреди за мерење активна и реактивна моќност и/или енергија, во несинусни услови, е реализиран во Лабораторијата за Електрични Мерења (ЛЕМ), при Факултетот за Електротехника и Информациски Технологии (ФЕИТ), на Универзитетот "Св. Кирил и Методиј" во Скопје (УКИМ). Лабораторијата е акредитирана по меѓународниот стандард МКС EN ISO/IEC 17025:2018 [81], за калибрација на мерила и еталони за електрични величини. Во посед на лабораторијата, во делот на калибрација на уреди за мерење електрична моќност/енергија, фигурираат два еталони, илустрирани на Слика 3.6, кои поседуваат следливост до Меѓународното биро за мери и тегови (BIPM) [82].



Слика 3.6 ZERA COM3003 и CALMET C300, примарен и секундарен еталон на ЛЕМ во доменот на мерење електрична моќност и енергија

Примарниот еталон на лабораторијата, ZERA COM3003 [83], претставува трифазен компаратор за активна и реактивна енергија, од класа на точност 0,01, наменет за поврзување во различни испитни конфигурации. Мерниот опсег на конкретниот уред е ограничен на мерење напони до 480 V, односно струи до 200 A, по фаза. На дисплејот од овој еталон, можен е приказ на повеќе различни режими на мерење. Од практичен интерес за конкретната апликација се режимите на мерење Actual Values и Harmonics, прикажани на Слика 3.7 а) и б). Режимот Actual Values, илустриран на Слика 3.7 а), пред корисникот ги прикажува моменталните резултати од мерењето на:

- ефективните вредности на трифазните напони (фазни и линиски) и струи,
- активната, реактивната и привидната моќност по фаза, како и трифазните вредности,
- фазните агли помеѓу трите фазни напони и трите фазни струи,
- фазните поместувања помеѓу фазните напони и фазните струи,
- факторот на моќност по фаза, како и трифазниот фактор на моќност.

Преку приказот **Harmonics,** Слика 3.7 б), на дисплејот од примарниот еталон [83] може да се набљудува измерениот релативен удел на вишите хармоници и нивните почетни фазни поместувања во однос на фундаменталните компоненти, за секој од трифазните напонски или струјни сигнали. Ова мени овозможува приказ на фреквенцискиот спектар на сигналите до 50^{тнот} хармоник.

Секундарниот еталон, CALMET C300 [68], има централно место во испитувањата кои се реализирани во рамки на докторската дисертација. Станува збор за трифазен генератор (калибратор) на напони до 560 V и струи до 120 A, по фаза, од класа на точност 0,02. Со помош на овој уред може да се генерираат сигнали со синусен бранов облик и различно фазно поместување, како и хармониски – изобличени напони и струи. За управување на CALMET C300 [68] се користи софтверот Calpro 300 [84], кој е инсталиран на хардверска единица, поврзана со самиот еталон преку RS232 интерфејс.



Слика 3.7 Приказ на а) Actual values и б) Harmonics мениата од примарниот еталон ZERA COM3003

Нагодувањето на хармониските изобличувања на генерираните напони и струи се врши преку **Waveform** менито од софтверот Calpro 300 [84] и избор на опцијата **Harmonics**. Со конкретниот сет наредби се отвора прозорец, прикажан на Слика 3.8, преку кој се задаваат вредности за процентуалниот удел и почетното фазно поместување на вишите хармоници до 31^{ви} ред, во однос на фундаменталните компоненти. Во зависност од избраната опција, можно е дефинираното хармониско изобличување да се пренесе на сигналите од сите три фази, да се дефинира засебно изобличување за напоните и струите, или уделите и фазните поместувања да се дефинираат поединечно за секој напон, односно струја. Како што може да се забележи од Слика 3.8, со задавање различен удел, односно фазно поместување за поединечните виши хармоници, на десната страна на екранот се исцртува брановиот облик на сигналот во рамките на една периода, која одговара на компонентата со фундаментална фреквенција. Воспоставеното изобличување се зачувува во базата на податоци на самиот софтвер, како засебна датотека, и може понатаму да се користи во различни испитни постапки.

Од аспект на тестирање броила, се применува вградената опција **Test System>Electricity Meter**, од софтверот Calpro 300 [84], наменета за автоматско испитување броила. Реализацијата на една автоматизирана тест процедура се состои од неколку чекори. Најпрво, во софтверот се внесуваат номиналните електрични параметри за самото броило. Потоа, се преминува кон дефинирање поединечни мерни точки, Слика 3.9. Вредноста на испитниот напон, односно струја, за секоја мерна точка, се задава како процентуален удел од номиналните параметри на броилото. Типот на оптоварување се внесува во форма на фазен агол помеѓу испитните напони и струи, или во форма на фактор на моќност. Доколку тестирањето треба да опфати хармониски – изобличени сигнали, на прозорецот прикажан на Слика 3.9, се означува полето **Waveform**, и од постоечката база на податоци се избира претходно дефинираното изобличување. При хармониски – изобличени сигнали, зададената вредност за фазниот агол или факторот на моќност се однесува на фундаменталните компоненти на сигналите. Во долниот дел од менито за нагодување на мерните точки, се избира времетраењето на тестот и бројот на поединечни мерења. Тест

процедурата се стартува со избор на опцијата Auto Test oд менито Test System и повикување на постоечките записи за номиналните параметри на броилото и мерната процедура со претходно утврдените испитни точки.



Слика 3.8 Прозорец за нагодување хармониско изобличување на софтверот Calpro 300



Слика 3.9 Прозорец за нагодување тест процедура за испитување броило на софтверот Calpro 300

За да се реализира автоматизираната мерна постапка, потребно е секундарниот еталон на ЛЕМ [68], да добива информација за одзивот на броилото, кога истото е подложено на сигнали со параметри, дефинирани согласно нагодувањата на мерната процедура. Тоа се постигнува, доколку во текот на испитната постапка, се регистрираат импулсите од оптичкиот или електричниот излез на броилото. На Слика 3.10, прикажана е шема на поврзување трифазно броило за активна енергија, во рамките на автоматизирана испитна постапка со CALMET C300 [68].



Слика 3.10 Шема на поврзување трифазно броило за активна енергија во конфигурација за автоматизирано тестирање со CALMET C300

Оптичките импулси, кои се пропорционални на енергијата измерена со испитуваниот уред, се регистрираат со помош на оптички преобразувач, поврзан на влезот од соодветен модул за аквизиција на податоци. Модулот за аквизиција на податоци се приклучува на импулсниот влез на секундарниот еталон [68], па на тој начин до референтниот уред пристигнува информација за измерената енергија со тестираното броило. Овој податок се процесира со помош на софтверот Calpro 300 [84] и пред корисникот се прикажува резултат во форма на релативна грешка од мерењето:

$$\delta = \frac{W_{UUT} - W_{C300}}{W_{C300}} \cdot 100 , \qquad (3.14)$$

каде што W_{UUT} е измерената енергија со испитуваниот уред, а W_{C300} е референтната енергија, генерирана од страна на CALMET C300 [68], која одговара на претходното сетирање на

испитните сигнали. Измерената енергија, *W*_{UUT}, се утврдува врз база на бројот на импулси, *m*, детектирани со оптичкиот преобразувач:

$$W_{UUT} = \frac{m}{c},\tag{3.15}$$

каде што *с* е константата на броилото. Референтната (активна) енергија, *W*_{C300}, во несинусен режим, се пресметува како:

$$W_{C300} = \left[\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \cos \varphi_h\right] t, \qquad (3.16)$$

каде што t е временскиот интервал за кој се регистрираат m импулси. Изразот (3.16) се однесува на монофазен уред за активна енергија. Доколку тестираното броило е трифазно, треба да се применат изразите (2.18) или (2.19), во зависност од тоа дали испитувањата се спроведени во симетрични или несиметрични услови. Доколку испитната постапка се спроведе врз броило за реактивна енергија, за пресметка на W_{C300} , треба да се примени некој од пристапите презентирани во второто поглавје од докторскиот труд, базиран на конкретна дефиниција за реактивна моќност.

Вообичаена пракса е да се направат повеќе мерења во некоја мерна точка, со цел да се детектираат случајните варијации во покажувањето на испитуваниот уред, при константни влезни сигнали. При ваков режим на тестирање, Calpro 300 [84] ја прикажува средната вредност од детектираните отстапувања, придружена со стандардната девијација на поединечните мерења:

$$\delta_M = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta_i , \qquad (3.17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M} (\delta_i - \delta_M)^2},$$
(3.18)

каде што δ_M е средната грешка од M направени мерења, а δ_i се поединечните резултати добиени согласно изразот (3.14).

4. ПРВИЧНИ ИСПИТУВАЊА БРОИЛА СО НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ

Првичните испитувања, спроведени во рамки на докторската дисертација, се применети со цел верификација на теоретските согледувања, претставени во претходното поглавје, околу можностите за мерење моќност/енергија во несинусни услови, со уреди базирани на различен принцип на мерење. Заклучоците од ова тестирање, понатаму ќе послужат како основа за дефинирање детална мерна постапка за приказ на одзивот на едно броило, при хармониски – изобличени напони и струи.

За потребите на воведното испитување искористени се три броила за активна енергија: индукциско, електронско и дигитално. Тестирањето на трите броила е спроведено со напони и струи кои поседуваат непарни виши хармоници со случаен удел и случајно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти. И покрај тоа што се избрани сигнали со случајно хармониско изобличување, *THD* факторот ќе биде ограничен на 10 %, за трифазните напони, односно на 40 %, за трифазните струи. На тој начин се воспоставува корелација помеѓу добиените резултати и заклучоците презентирани во претходни публикации [21-22], кои се базирани на постоечките стандарди и препораки [27-28].

4.1. Основни податоци за испитуваните уреди и калибрација со синусни сигнали

Техничките карактеристики на трите броила за активна енергија кои се предмет на ова испитување се прикажани во Табела 4.1. Броилата се така избрани за да се опфатат различните принципи на мерење активна енергија, презентирани во претходното поглавје од докторскиот труд. Како што може да се воочи од Табела 4.1, електронското и дигиталното броило претставуваат трифазни уреди, додека индукциското броило претставува уред со по една напонска и струјна намотка, т.е. монофазен инструмент. Индукциското и електронското броило се наменети за поврзување во нисконапонски систем (директно или полуиндиректно) и имаат класа на точност 2 (или A согласно номенклатурата наведена во OIML R 46-2 & 1:2012 [28]), додека дигиталното броило е наменето за индиректно мерење (U_n =58 V и I_n =5 A), и истото поседува класа на точност 0,5 (или C согласно номенклатурата наведена во OIML R 46-2 & 1:2012 [28]).

Пред да се започне со испитување на броилата во несинусни услови, истите треба да се верификуваат со примена на синусни сигнали. Стандардот [27] наложува мерењата да се спроведат најмалку во точка која соодветствува на напон, еднаков на номиналниот, и струја, еднаква на 50 % од вредноста на номиналната струја, при фактор на моќност, соs φ , еднаков на 1. Во препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28], наведени се и други мерни точки кои се однесуваат на целокупниот опсег за мерење струја, од минималната струја, при која броилото започнува да регистрира енергија во рамки на декларираните граници на грешка, до максимално дозволената струја, која соодветсвува на декларираните граници на грешка, за фактор на моќност соs φ =0,8 C (или соs φ =0,5 C за броилата од класа C и D).

П	Тип на броило						
параметар	Индукциско	Електронско	Дигитално				
Производител	Iskra	Siemens	Landis+Gyr				
Модел	E3 7EC49 52-2CM41		ZMD405CT44.2407				
Број на фази	1	3	3				
Номинален напон, $U_n(\mathbf{V})$	220	3.220/380	3.58/100				
Номинална струја, <i>I</i> _n (A)	10	10	5				
Максимална струја, <i>I_{max}</i> (А)	30	40	6				
Класа на точност	2	2	0,5				
Константа (imp.(vrt.)/kWh)	750	480	40000				

Табела 4.1 Технички карактеристики за трите испитувани броила

Во рамки на конкретната испитна процедура, броилата ќе бидат тестирани во шест мерни точки. Во сите мерни точки, вредноста на испитниот напон е еднаква на номиналниот параметар на броилото. Покрај струја еднаква на 50 % од номиналната вредност, тест процедурата ќе опфати и мерни точки во кои ќе биде применета номиналната струја за секој уред. Во однос на факторот на моќност, три различни вредности ќе бидат усвоени во текот на испитната постапка. Верификацијата на перформансите на броилата ќе биде направена за $\cos \varphi = 1$, $\cos \varphi = 0.5$ L и $\cos \varphi = 0.8$ C (односно за фазни агли $\varphi = 0^{\circ}$, $\varphi = 60^{\circ}$ и $\varphi = -36.87^{\circ}$). Поради различните константи на броилата, во поединечните тест процедури, ќе биде дефиниран различен референтен број импулси/вртежи, *m*, кои треба да се детектираат во рамките на секоја мерна точка. Така, индукциското и електронското броило ќе се испитуваат со регистрирање пет вртежи, односно импулси, во рамките на едно мерење, за секоја мерна точка, додека дигиталното броило подлежи на тест процедура која опфаќа регистрирање на сто импулси, по мерење, за секоја точка од дефинираната процедура. Во рамките на една мерна точка се прават по пет мерења, а резултатите се прикажуваат како аритметичка средина на измерените отстапувања на броилото во однос на генерираната референтна енергија со секундарниот еталон на ЛЕМ, CALMET C300 [68]. Покрај усреднетата грешка, равенки (3.14) и (3.17), се приложува и стандардната девијација на поединечните мерења, равенка (3.18).

Во Табела 4.2, прикажани се резултатите од калибрацијата на броилата, со синусни тест сигнали. Може да се забележи дека измерените отстапувања, при тестирање на дигиталното и електронското броило се во рамки на максимално дозволените грешки, согласно нивната класа на точност. Максимално дозволените интринсични грешки кај броилата од класа A, согласно препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28], не треба да надминуваат ± 2 %, при соs φ =1, односно $\pm 2,5$ %, при екстремните точки за факторот на моќност, соs φ =0,5 L и соs φ =0,8 C. Кај броилата од класа C, на кои припаѓа дигиталното броило, максималната базна грешка не смее да надмине $\pm 0,5$ %, при соs φ =1, односно $\pm 0,6$ %, при соs φ =0,5 L и

 $\cos \phi = 0.8$ С, за конкретниот опсег на испитни струи. Покрај со мали отстапувања, овие два уреди се карактеризираат и со висока стабилност, која се утврдува од вредностите за стандардната девијација.

Од друга страна, за индукциското броило регистрирани се отстапувања кои ги надминуваат максимално дозволените грешки, согласно класата на точност. Ова е очекуван исход, имајќи ја предвид староста на инструментот и годините на експлоатација во различни услови. Иако, грешки со овој интензитет, ја ограничуваат можноста за практична примена на конкретниот уред, истиот е адекватен за потребите на понатамошната анализа. Имено, анализата која следува ќе се сведе токму на споредба помеѓу перформансите на броилата во синусен и несинусен режим на мерење. На тој начин би се постигнала практична верификација на теоретските забелешки, презентирани во претходното поглавје од докторскиот труд, од аспект на соодветноста за апликација на некој конкретен тип броила за мерење активна енергија во несинусни услови. Со други зборови, грешките, особено кај конкретното индукциско броило, при несинусни напони и струи, ќе се разгледуваат од перспектива на интензитетот на интринсичните отстапувањата, презентирани во Табела 4.2.

Мерна точка	Индукциско броило		Електронско броило		Дигитално броило	
	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi = 1$	-3,64	±0,041	-0,66	±0,005	0,14	±0,004
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos\varphi=0,5 \text{ L}$	-3,21	±0,081	-0,92	±0,002	0,07	±0,005
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos\varphi=0,8 \text{ C}$	-4,01	±0,043	-0,57	±0,048	0,13	±0,005
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi=1$	-2,77	±0,013	-0,63	0	0,16	±0,005
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi=0.5 \text{ L}$	-2,67	±0,025	-0,83	0	0,04	±0,006
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi=0.8 \text{ C}$	-2,97	±0,013	-0,52	±0,006	0,18	±0,004

Табела 4.2 Резултати од калибрацијата на трите броила со синусни наизменични сигнали

4.2. Предложени хармониски – изобличени тест сигнали

Испитувањето на броилата, во несинусни услови, опфаќа три тест процедури, во кои се применуваат напони и струи со случајно хармониско изобличување, согласно претходно споменатите ограничувања за *THD* факторот. Во фреквенцискиот спектар на применетите напони и струи, фигурираат само непарни виши хармоници, чии максимални компоненти поседуваат фреквенција не поголема од 1 kHz, т.е. анализата е спроведена заклучно со 19^{тиот} хармоник. Секој од предложените сетови тест сигнали се карактеризира со некоја специфичност, која понатаму треба да генерира аргументи за општа прифатливост на заклучоците и која би дала насоки за понатамошно детално испитување. Потребно е да се нагласи дека, во случајот на електронското и дигиталното броило, мерењата се реализираат во трифазни симетрични услови, т.е. наведеното изобличување е идентично пресликано врз испитните напони и струи од сите три фази. Во Табела 4.3 прикажани се процентуалните удели на вишите хармоници и нивното почетно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти, за првиот сет испитни сигнали. Конкретниот сет изобличувања опфаќа виши хармоници до $13^{\text{ти}}$ ред (максимална фреквенција од 650 Hz), во напонските сигнали, односно компоненти од максимален $15^{\text{ти}}$ ред (фреквенција од 750 Hz), во струјните сигнали. Согласно изразот (2.17), струјните хармоници од $15^{\text{ти}}$ ред, нема да придонесат со засебна компонента во вкупната активна моќност, имајќи предвид дека $u_{15,\%}=0$ %. Вишите хармоници, прикажани во Табела 4.3, резултираат со мало вкупно хармониско изобличување, далеку под ограничувањата од 5% или 10% за напонските, односно 40% за струјните сигнали, наведени во [27-28]. Процентуалните удели на поединечните компоненти поседуваат опаѓачки тренд, гледано во однос на нивната фреквенција. Дополнително, секој од вишите хармоници е во фаза со фундаменталниот напон, односно струја, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти во моментот на почеток на позитивната полупериода.

h	$u_{h,\%}(\%)$	$ heta_{uh}$ (°)	$i_{h,\%}$ (%)	$ heta_{ih}$ (°)
3	2,45	0	7,25	0
5	1,16	0	6,32	0
7	0,76	0	4,2	0
9	0,24	0	2,26	0
11	0,13	0	1,19	0
13	0,05	0	0,42	0
15	0	0	0,63	0
THD (%)	2,83		10	,83

Табела 4.3 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници во првиот сет тест сигнали

Процентуалниот удел и почетното фазно поместување на вишите хармоници, во однос на напоните и струите со фреквенција од 50 Hz, кои го сочинуваат вториот сет испитни сигнали е прикажан во Табела 4.4. Вкупните хармониски изобличувања на сигналите, се приближно на половина од декларираните гранични вредности, согласно [27], и истите изнесуват *THD*_U=7 %, односно *THD*_I=20,82 %, респективно. Овој сет сигнали, опфаќа виши хармоници со фреквенција до 950 Hz (19^{тн} хармоник), кои покрај случајна вредност за уделот, поседуваат и случајно фазно поместување во однос на фундаменталните напони и струи, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти, во моментот на почеток на позитивната полупериода. Она што е карактеристично, за напонските и струјните сигнали прикажани во Табела 4.4, е отсуството на т.н. тројни хармоници, односно компоненти со фреквенција која е целоброен мултипл на 3.

h	$u_{h,\%}(\%)$	$ heta_{uh}$ (°)	$i_{h,\%}$ (%)	$ heta_{ih}$ (°)	
3	0	0	0	0	
5	6,2	356	18,3	278	
7	2,5	215	8,64	114	
9	0	0	0	0	
11	1,32	324	4,23	69	
13	0,17	248	1,78	95	
15	0	0	0	0	
17	1,6	18	0,56	13	
19	0,08	125	1,3	17	
<i>THD</i> (%)		7	20,82		

Табела 4.4 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници во вториот сет тест сигнали

Податоците за поединечните виши хармоници, кои го сочинуваат третиот сет испитни сигнали, се прикажани во Табела 4.5. Карактеристично за овој сет тест сигнали е тоа што истите поседуваат најголемо вкупно хармониско изобличување. За трифазните напони изобличувањето изнесува *THD*_U=9,99 %, додека за трифазните струи изобличувањето е еднакво на *THD*_I=33,53 %. Од друга страна, и во напонските и во струјните сигнали фигурираат само пет виши хармоници, заклучно со компонентата од 11^{ти} ред (фреквенција од 550 Hz). Уделот и почетното фазно поместување на поединечните виши хармоници имаат случајна вредност, и не се карактеризираат со апсолутно опаѓачки тренд. Имено, кај напонскиот сигнал може да се забележи дека уделот на 9^{тиот} хармоник е помал од уделот на 11^{тиот} хармоник, а сличен феномен може да се забележи доколку се обрати внимание на 7^{миот} и 9^{тнот} хармоник во струјниот сигнал.

h	$u_{h,\%}(\%)$	$ heta_{uh}$ (°)	<i>i_h</i> ,% (%)	$ heta_{ih}$ (°)	
3	8,26	114	26,3	223	
5	5,36	223	15	146	
7	1,11	96	7,63	98	
9	0,62	179	11	342	
11	1,14	332	5,32	46	
<i>THD</i> (%)	9,99		33,53		

Табела 4.5 Процентуален удел и почетно фазно поместување на вишите хармон	ници во
третиот сет тест сигнали	

4.3. Резултати од испитување на броилата со хармониски – изобличени напони и струи

Во понатамошното изложување ќе бидат прикажани резултатите од испитувањето на трите броила со претходно предложените тест сигнали, кои вклучуваат виши хармоници со случаен удел и случајно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти. Резултатите ќе бидат прикажани табеларно, засебно за секој сет испитни напони и струи. Интензитетот на грешките кои се регистрирани за трите уреди ќе биде продискутиран од аспект на особеностите на применетите сигнали, но и од аспект на мерниот алгоритам имплементиран во самите броила.

Испитувањето на трите уреди е реализирано во истите шест мерни точки, во кои е спроведена процедурата за одредување на интринсичните грешки, Табела 4.2. Треба да се напомене дека наведените ефективни вредности на напоните и струите се однесуваат на целокупните, хармониски – изобличени, сигнали, равенки (2.5) и (2.6). Од друга страна, факторот на моќност, кој ги детерминира поединечните мерни точки во Табела 4.2, во испитните процедури кои опфаќаат виши хармоници, се однесува на фазниот агол помеѓу фундаменталните напони и струи, односно станува збор за т.н. фундаментален фактор на моќност, соs q_1 .

Во Табела 4.6, илустрирани се грешките при испитувањето на трите броила, во однос на референтната активна енергија, генерирана со лабораторискиот секундарен еталон, CALMET C300 [68], за првиот сет тест сигнали. Од прикажаните резултати, може да се забележи дека отстапувањата на дигиталното и електронското броило се речиси идентични со интринсичните грешки, измерени во референтни синусни услови, Табела 4.2. Со други зборови, покажувањата на овие инструменти се во рамки на границите на грешка утврдени согласно нивната класа на точност. Измерените отстапувања не ги надминуваат максимално дозволените грешки во хармониски – изобличени услови, кои, според препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28], се за ±1 %, односно ±0,3 %, поголеми во однос на максимално дозволените грешки во синусен режим, за броилата од класа А, односно класа С, респективно. Треба да се напомене дека, во [28], наведените поместувања на максимално дозволената грешка во несинусни услови, за броила од различна класа на точност, се однесуваат на фундаментален фактор на моќност $\cos \varphi_1 = 1$ и вкупно хармониско изобличување, THD, кое не надминува 5 % за напонските, односно 40 % за струјните сигнали. Направените испитувања потврдуваат дека овие два уреди мерат во рамки на декларираните класи на точност и во случај на несинусни влезни сигнали, чиишто виши хармоници се во фаза со напоните и струите со фреквенција од 50 Hz, при минување низ нулата на поединечните компоненти на сигналите, во моментот на почеток на позитивната полупериода.

Од друга страна, кај индукциското броило се забележува разлика помеѓу резултатите, добиени во двата режими на тестирање, особено при фундаментален фактор на моќност, $\cos\varphi_1$, различен од 1. Кога фундаменталните компоненти на напонот и струјата се меѓусебно во фаза, во фаза ќе бидат и вишите хармоници од различен ред, имајќи предвид дека $\theta_{uh}=0^{\circ}$ и $\theta_{ih}=0^{\circ}$, за секое *h*, равенка (2.15). Во двете мерни точки кои одговараат на $\varphi_1=0^{\circ}$ не се регистрирани отстапувања значително поразлични од оние добиени во синусен режим на тестирање. При фундаментални фазни агли од $\varphi_1=60^{\circ}$ и $\varphi_1=-36,87^{\circ}$, грешките кои се јавуваат кај ова броило се поместуваат во позитивна, односно негативна насока. Притоа, разликата помеѓу покажаната и референтната активна енергија е поевидентна при $\cos\varphi_1=0,5$ L, т.е.

кога постои помал севкупен удел на активна моќност во системот. Иако, во овие точки се регистрирани отстапувања кои укажуваат дека броилото е во рамки на декларираната класа на точност, треба да се земат во предвид и почетните услови при испитувањето, т.е. интензитетот на неговите интринсични грешки, кои покажуваат дека истото регистрира помеѓу 3 % и 4 % помалку активна енергија од актуелната потрошувачка во системот.

Причините за постоење разлика во покажувањето на индукциското броило, во синусен и несинусен режим на тестирање, може да се лоцираат во теоретските забелешки презентирани во претходното поглавје од докторскиот труд. Имено, постои можност броилото да е така конструктивно изведено, за магнетните флуксови кои одговараат на вишите хармоници да не доспеваат до алуминиумскиот диск [11]. Во тој случај, истото ќе ја регистрира единствено активната енергија која произлегува од напоните и струите со фреквенција од 50 Hz. Имајќи предвид дека изобличувањето на тест сигналите е мало, при $\cos\varphi_1=1$ активната енергија која произлегува од фундаменталните компоненти на сигналите е речиси еднаква со вкупната активна енергија. Ако се претстават аналитички, компонентите на активна енергија од вишите хармоници се помалку од 0,5 % од вкупната активна енергија во системот. При $\cos\varphi_1\neq 1$, вкупниот удел на активна енергија во системот е помал, а тоа подразбира и помала референтна вредност за споредба, па оттука се регистрираати и поголеми отстапувања.

Одзивот на индукциското броило и грешките кои истото ги прави, можат да се моделираат со равенките (3.2)-(3.4). Бидејќи овие броила се се помалку застапени во пракса, деталната анализа на нивниот одзив нема да биде предмет на понатамошна обработка во докторскиот труд.

Мерна точка	Индукциско броило		Електронско броило		Дигитално броило	
	δ (%)	σ (%)	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=1$	-3,67	±0,016	-0,64	±0,044	0,11	±0,003
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,5 L$	0,4	±0,023	-0,85	±0,041	0,032	±0,003
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,8 \text{ C}$	-5,19	±0,034	-0,56	0	0,14	±0,005
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=1$	-2,89	±0,011	-0,56	±0,053	0,14	±0,005
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=0,5 \text{ L}$	1,01	±0,017	-0,96	±0,051	-0,026	±0,003
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=0,8 \text{ C}$	-4,28	±0,014	-0,44	±0,065	0,21	±0,005

Табела 4.6 Резултати од испитувањето на трите броила со првиот сет хармониски – изобличени сигнали

Резултатите од испитувањето на броилата со вториот и третиот сет тест сигнали се прикажани во Табела 4.7 и Табела 4.8, соодветно. Кај индукциското броило снимена е слична диспозиција на грешки како и во случајот на првата тест процедура. За конкретниот уред, дури и при поголемо хармониско изобличување на применетите напони и струи, се забележуваат речиси идентични грешки како во синусен режим на испитување, во мерните точки кои соодветствуваат на $\cos\varphi_1=1$. Кога фундаменталните напон и струја не се меѓусебно во фаза, детектирани се поголеми отстапувања, кои очигледно зависат од уделот и почетните фазни поместувања на поединечните виши хармоници.

Мерна точка	Индукциско броило		Електронско броило		Дигитално броило	
	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos\varphi_1=1$	-3,95	±0,04	-0,49	±0,054	0,29	±0,003
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,5 L$	-1,87	±0,041	2,17	±0,041	3,02	±0,005
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,8 \text{ C}$	-4,33	±0,02	-1,83	±0,003	-0,87	±0,005
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=1$	-2,65	±0,009	-0,46	±0,057	0,31	±0,004
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=0.5 \text{ L}$	-1,05	±0,011	2,1	±0,05	3,04	±0,008
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=0.8 \text{ C}$	-2,91	±0,018	-1,45	±0,073	-0,81	±0,003

Табела 4.7 Резултати од испитувањето на трите броила со вториот сет хармониски – изобличени сигнали

Табела 4.8 Резултати од испитувањето на трите броила со третиот сет хармониски – изобличени сигнали

Мерна точка	Индукциско броило		Електронско броило		Дигитално броило	
	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$	δ (%)	$\sigma(\%)$
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos\varphi_1=1$	-3,82	±0,01	-0,74	±0,039	0,086	±0,002
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,5 L$	-2,21	±0,027	1,87	±0,026	2,97	±0,007
$U=U_n, I=0,5I_n, \cos \varphi_1=0,8 \text{ C}$	-7,79	±0,034	-5,52	±0,031	-4,81	±0,003
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=1$	-2,51	±0,007	-0,67	±0,088	0,085	±0,008
$U=U_n, I=I_n, \cos\varphi_1=0.5 \text{ L}$	-0,7	±0,009	3,17	±0,057	2,9	±0,006
$U=U_n$, $I=I_n$, $\cos\varphi_1=0,8$ C	-6,36	±0,012	-5,78	±0,057	-4,77	±0,004

Она што е особено интересно е фактот што, диспозицијата на грешките, измерени за индукциското броило, се пресликува и кај преостанатите два мерни уреди, во случај на испитните процедури кои ги опфаќаат вториот и третиот сет тест сигнали. Имено, регистрираните отстапувања, и кај електронското и кај дигиталното броило, во двете мерни точки кои соодветствуваат на фундаментален фактор на моќност, $\cos\varphi_1$, еднаков на 1, и во двете испитни процедури, се во рамки на дозволените граници на грешка од ±3 % и ±0,8 %, согласно [28]. Дополнително, овие грешки се споредливи со интринсичните отстапувања на мерилата, измерени во истите мерни точки, Табела 4.2. Грешките во втората испитна процедура, при $\cos\varphi_1=1$, и кај двата мерни уреди, се поместени за приближно 0,2 % во позитивна насока во однос на нивните интринсични отстапувања. Измерените отстапувања, во истите две мерни точки, за третиот сет тест сигнали, се поместени за приближно -0.1 %, во однос на грешките добиени за синусен режим на тестирање. Со други зборови, електронското и дигиталното броило, при $\cos\varphi_1=1$, ги задоволуваат дури и ограничувањата за максимално дозволените грешки на уредите од класа А и класа С, ± 2 % и $\pm 0,5$ % респективно, кои се валидни за мерење во синусни услови. Ова е очекуван исход, имајќи ги

во предвид принципите на мерење на електронските и дигиталните броила, илустрирани преку равенките (3.6) и (3.7), и нивната усогласенот со начинот на изразување активна моќност, при хармониски – изобличени напони и струи, равенки (2.17)-(2.19). Според досега изложеното, може да се претпостави дека разликата помеѓу грешките измерени во синусен и несинусен режим на тестирање, се должи исклучиво на влијанието на вишите хармоници врз колата за прилагодување на мерните сигнали. Интересно е тоа што вториот сет испитни сигнали резултира со поголеми грешки во мерењето, иако напоните и струите се карактеризираат со помало вкупно хармониско изобличување во однос на третиот сет тест сигнали. Овој феномен може да се препише делумно и на фактот што во вториот сет тест сигнали фигурираат повеќе хармониски компоненти, со повисока фреквенција.

Отстапувањата, и на електронското, и на дигиталното броило, во преостанатите мерни точки, кои соодветствуваат на фундаментален фазен агол φ_1 , различен од 0°, се значително поголеми од интринсичните грешки, регистрирани при испитување со синусни тест сигнали. Во препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28] не се наведени дополнителни грешки поради присуството на виши хармоници, за броилата од различна класа, при $\cos\varphi_1$ различен од 1. Доколку се искористат наведените ограничувања на базните грешки, во синусни услови на мерење, и ограничувањата на дополнителните грешки, поради присуството на виши хармоници со максимална дисторзија *THD*_U=5 % и *THD*_I=40 %, наведени за $\cos\varphi_1=1$, тогаш потребно е покажувањето на електронското броило од класа A да не отстапува повеќе од ±3,5 % во однос на референтната енергија, при $\cos\varphi_1=0,5$ L и $\cos\varphi_1=0,8$ C. Аналогно, дигиталното броило од класа C, при идентично хармониско изобличување, не треба да отстапува повеќе од ±0,9 %, во однос на референтната енергија.

Границите на грешка согласно [28], се запазени во случајот на испитување на електронското броило со вториот сет тест сигнали. Отстапувања, помали по апсолутна вредност од максимално дозволените граници на грешка, се забележуваат и во рамки на испитната процедура со третиот сет тест сигнали, но само во мерните точки кои одговараат на $\cos\varphi_1=0,5$ L. Во мерните точки кои соодветствуваат на капацитивно оптоварување, регистрирани се отстапувања речиси двојно поголеми од границите на грешка од $\pm 3,5$ % и истите имаат негативен предзнак. Од друга страна, дигиталното броило, мери во рамки на својата класа на точност, единствено при $\cos\varphi_1=0,8$ C, и тоа при тестирањето кое го опфаќа вториот сет испитни напони и струи. Во сите преостанати мерни точки, прикажани во табелите 4.7 и 4.8, измерената грешка е неколкукратно поголема од $\pm 0,9$ %, и истата го менува предзнакот во зависност од тоа дали броилото подлежи на индуктивно или на капацитивно оптоварување. Треба да се напомене дека напонското изобличување и кај двата сета испитни сигнали е поголемо од наведеното ограничување согласно препораката [28].

И покрај тоа што мерните резултати, добиени при испитувањето на двете броила, различно се толкуваат од аспект на максимално дозволените грешки, диспозицијата на отстапувањата укажува на постоење корелација помеѓу покажувањата на двата уреди. Имено, и кај електронското и кај дигиталното броило, при $\cos\varphi_1=0.5$ L, грешките се помесуваат во позитивна насока за околу 3 %, во однос на отстапувањата измерени при тестирање со синусни сигнали. Ова тврдење е валидно и за двете испитни процедури, што укажува на тоа дека степенот на изобличување на напоните и струите не влијае значително на перформансите на броилата. Кога мерилата се изложени на капацитивно оптоварување, се воочува сосема спротивна ситуација. Имено, при тестирање со вториот сет хармониски – изобличени сигнали, грешките и кај двете броила се поместуваат за приближно -1 % во

однос на интринсичните отстапувања. Од друга страна, кога броилата подлежат на третиот сет испитни напони и струи, нивното покажување е за приближно 5 % помало од референтната енергија, генерирана со секундарниот еталон на лабораторијата [68]. Ваквата диспозиција на грешките укажува на тоа дека истите се резултат на идентичен феномен, кој подеднакво влијае на покажувањата на различните мерила за активна енергија.

Од спроведените мерења и добиените резултати можат да се извлечат неколку значајни заклучоци кои треба да послужат како основа за воспоставување испитна процедура, преку која детално ќе се прикаже одзивот на броилата за активна енергија, во несинусни, хармониски – изобличени услови. Најпрво, иако според теоретски наведените принципи на мерење, равенки (3.6) и (3.7), и електронското и дигиталното броило се очекува да ја регистрираат вкупната активна моќност/енергија со минимална дополнителна грешка, која е резултат единствено на влијанието на вишите хармоници врз аналогните кола за прилагодување, тоа е случај само доколку фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза. Како изолиран случај, во кој се регистрирани минимални дополнителни отстапувања, дури и кога $\varphi_1 \neq 0^\circ$, се јавува тест процедурата која соодветствува на првиот сет испитни сигнали, во кои вишите хармоници се во фаза со фундаменталните напони и струи, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти на сигналите во моментот на почеток на позитивната полупериода. Во општ случај, во оние мерни точки во кои фундаменталниот фазен агол е различен од 0°, се очекуваат отстапувања кои минимално зависат од степенот на изобличување на применетите напони и струи. Ова се докажува преку споредба на резултатите од поединечните испитни процедури, во кои се регистрирани грешки со различен интензитет и насока, за идентично хармониско изобличување на сигналите, но различен фундаментален фазен агол. Алтернативно, спроведените првични испитувања резултираат и со случај, во кој се регистрирани грешки со речиси идентична големина, при комплетно различни хармониски компонентни присутни во сигналите, но ист фундаментален фазен агол. Наведените забелешки, укажуваат на потреба од детална постапка во која ќе се регистрира одзивот на испитуваниот инструмент, при постепена промена на различни параметри на испитните сигнали. Резултатите од така дефинираната испитна постапка би требало да дадат одговор за начинот на кој еден мерен уред ги регистрира вишите хармоници, односно да ја прикажат промената на грешката, во функција од вредноста на различни параметри на испитните сигнали, која е резултат на алгоритамот на мерење, имплементиран во тестираниот уред. Заклучоците од првичните испитувања на трите различни броила за активна енергија, при хармониски – изобличени напони и струи, се презентирани во трудот [3], од листата на публикации.

5. ГРЕШКИ КАЈ ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ АКТИВНА МОЌНОСТ И/ИЛИ ЕНЕРГИЈА ПРИ НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ

5.1. Воведни забелешки

Од резултатите кои произлегуваат од првичните испитувања, може да се заклучи дека, во случај на напони и струи со случајни хармониски изобличувања, кај електронските и дигиталните броила, се јавуваат грешки кои можат да бидат и неколкукратно поголеми од декларираните граници на грешка, согласно нивната класа на точност. Интензитетот на отстапувањата во однос на интринсичните грешки, за исти тест сигнали, е речиси идентичен кај двата тестирани уреди, што наведува на заклучок дека, во најголем дел, овие грешки се резултат на еден ист физички феномен. Грешките на инструментите во однос на референтната вредност на мерената големина, се поизразени кога истите се испитуваат со тест сигнали кај кои постои фазно поместување помеѓу фундаменталните компоненти. За да се одреди причината за овие грешки, односно за да се прикаже деталниот одзив на еден уред за мерење активна моќност и/или енергија, во несинусни услови, потребно е да се продолжи анализата со детални испитувања, кои ќе опфатат промена на различни параметри на изобличените сигнали. Појдовна точка за воспоставување на испитниот протокол претставуваат сигналите наведени во стандардот EN 50470-3 [27], во кои фигурираат виши хармоници од 5^{тн} ред, покрај фундаменталните напони и струи.

За да се прикаже одзивот на инструментите во функција од промената на различни фундаментални и хармониски параметри на приложените сигнали, испитувањето ќе опфати пет независни тест процедури. Во секоја процедура, покрај фундаменталните компоненти, во трифазните напони и струи ќе фигурираат и виши хармоници од само еден ред. Поединечните процедури соодветствуваат на промена на само еден параметар на вишите хармоници, додека останатите параметри се одржуваат на константна вредност. Нагодувањето на тест сигналите, е прикажано во Табела 5.1. Ознаката *вар*. во поединечните колони од табелата укажува на параметар на вишите хармоници кој е променлив (варијабилен) во конкретната процедура. Од податоците наведени во Табела 5.1 може да се заклучи дека, во првите четири тест процедури ќе бидат применети напони и струи со виши хармоници од 5^{ти} ред. Како променливи параметари се јавуваат почетните фазни поместувања и уделите на вишите струјни и напонски хармоници во однос на фундаменталните компоненти на сигналите. Последната процедура се однесува на промена на редот на вишите хармоници, присутни во испитните напони и струи, при нивно константно вкупно хармониско изобличување.

Секоја процедура се состои од неколку под – процедури, кои соодветствуваат на различна вредност за променливиот параметар на вишите хармоници. Во поединечните под – процедури фигурираат по девет мерни точки, кои одговараат на различна вредност на фазниот агол помеѓу фундаменталните напони и струи, φ_1 . Фазниот агол φ_1 се менува во интервал помеѓу -60° и 60°, со чекор од 15°. Вредностите за φ_1 се избрани така што крајните точки од секоја под – процедура одговараат на фундаментален фактор на моќност, $\cos\varphi_1=0,5$ С, односно $\cos\varphi_1=0,5$ L. Сите мерења се реализирани со напони и струи, чии вредности се еднакви на номиналните параметри на испитуваниот уред, имајќи предвид дека грешките измерени при почетните тестирања, се минорно зависни од амплитудите на испитните сигнали. Испитниот протокол се спроведува во симетрични трифазни услови.

Испитна	Параметар на вишите хармоници				
процедура	h	$u_{h,\%}$ (%)	$i_{h,\%}$ (%)	$ heta_{uh}\left(ight)$	$ heta_{ih}\left(^{\circ} ight)$
1	5	10	40	0	вар.
2	5	10	40	вар.	60
3	5	10	вар.	0	60
4	5	вар.	40	0	60
5	вар.	10	40	0	60

Табела 5.1 Вредности за параметрите на вишите хармоници во секоја процедура од испитниот протокол

Деталниот опис на поединечните тест процедури, под – процедури и мерни точки е прикажан во Додатокот А, на крајот од овој докторски труд. За реализација на испитувањата, употребено е истото еталонско дигитално броило за активна енергија, врз кое беа спроведени и почетните тестирања, Landys+Gyr ZMD405CT44.2407, 3·58 V/100 V, 5 A, 50 Hz, од класа на точност 0,5 S (или класа C согласно [28]) [85]. Дигиталното броило е избрано пред електронското, бидејќи истото е претставник на генерацијата инструменти кои постепено стануваат доминантни, за конкретната примена, во светски рамки. За овој уред достапна е комплетната спецификација [85]. Броилото поседува висока класа на точност, а согласно резултатите од мерењата, прикажани во претходното поглавје, интринсичните грешки се незначителни во однос на измерените отстапувања, при хармониски – изобличени сигнали. Тоа значи дека измерените интринсични грешки нема да бидат земени предвид при понатамошното моделирање на отстапувањата во несинусен режим. Зарали верификација на состојбата на броилото [85], на Слика 5.1, прикажани се резултатите од неговата калибрација со примена на синусни напони и струи, во истите мерни точки во кои ќе бидат направени и мерењата во рамките на поединечните процедури и под – процедури од испитниот протокол.



Слика 5.1 Резултати од испитување на броилото Landys+Gyr ZMD405CT44.2407 со синусни сигнали

Во понатамошното изложување, резултатите од испитниот протокол ќе бидат прикажани во графичка форма, како релативни и апсолутни грешки на отчитувањата на броилото [85], во однос на референтната активна моќност, која се генерира со секундарниот еталон на ЛЕМ, CALMET C300 [68]. Релативните грешки се прикажуваат директно, како резултат на автоматизираната мерна постапка:

$$\delta_P = \frac{P_{UUT} - P_{C300}}{P_{C300}} \cdot 100 , \qquad (5.1)$$

и истите ќе бидат презентирани од перспектива на мерењето активна моќност, наместо активна енергија, заради поедноставен пристап, имајќи предвид дека грешката при мерење временски интервал е вообичаено занемарлива. Во изразот (5.1) со P_{UUT} е претставена трифазната активна моќност, измерена со броилото, додека P_{C300} е референтната активна моќност, генерирана со лабораторискиот секундарен еталон [68]. Приказот на грешките во релативен облик е погоден за анализа на степенот на отстапување на броилото во споредба со неговата класа на точност. Од друга страна, за моделирање на неговиот одзив, посоодветен е приказот на грешките во апсолутен облик:

$$\Delta P = P_{UUT} - P_{C300} , \qquad (5.2)$$

и имајќи предвид дека релативната грешка, δ_P , и зададената моќност, P_{C300} , се податоци кои се лесно достапни од софтверот за ракување со CALMET C300 [84], апсолутната грешка може да се изрази како:

$$\Delta P = P_{C300} \frac{\delta_P}{100}.$$
 (5.3)

5.2. Резултати од процедура која одговара на променлив почетен фазен агол на струен хармоник, θ_{i5}

Во рамки на првата мерна процедура, броилото [85] се испитува со напонски и струјни сигнали кои, покрај компонентите со фреквенција од 50 Hz, поседуваат виши хармоници од 5^{ти} ред. Напонскиот виш хармоник поседува вредност еднаква на 10 % од вредноста на фундаменталниот напон и е во фаза со него, при минувањето низ нулата на двете компоненти на сигналот во моментот на почеток на позитивната полупериода. Струјниот хармоник од 5^{ти} ред поседува амплитуда еднаква на 40 % од вредноста на фундаменталната струја, а неговиот фазен агол во однос на почетниот фазен агол на I_1 е променлив и вредноста на овој параметар ги детерминира поединечните под – процедури. Серии мерења, во девет мерни точки, се направени за осум различни вредности на θ_{i5} : 0°, 60°, 90°, 120°, 180°, 210°, 270° и 300°. Резултатите од мерењата, во форма на релативни грешки, се прикажани на Слика 5.2, како засебни криви $\delta_P = f(\varphi_1)$, за секоја вредност на θ_{i5} .

Од Слика 5.2 може да се заклучи дека, отстапувањата на покажувањето на броилото во однос на референтната активна моќност, генерирана со секундарниот еталон [68] на Лабораторијата, се различни во секоја мерна под – процедура, за различни вредности на θ_{i5} . Минимални отстапувања се забележуваат во случај кога θ_{i5} е 0° или 180°, односно кога 5^{тиот} струен хармоник е во фаза или во против – фаза со фундаменталната струја, при минувањето

низ нулата на двете компоненти на струјниот сигнал во моментот на почеток на позитивната полупериода. Интензитетот на отстапувањата во овие сетови мерења не надминува $\pm 1,2$ %, а екстремните вредности се добиени за фундаментален фазен агол, φ_1 , од -60° или 60°. Може да се заклучи дека грешката која ја прави броилото, во конкретните под – процедури, за најголемиот број мерни точки е во рамки на дозволените граници на грешка, од $\pm 0,8$ % до $\pm 0,9$ %, декларирани согласно препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28]. Амплитудите на поединечните криви на грешка, се зголемуваат со пораст на θ_{i5} до 90°, а потоа се забележува нивно опаѓање, при промена на θ_{i5} до 180°. Истото се забележува и кога θ_{i5} се менува помеѓу 180° и 360°, а максималните отстапувања се регистрирани кога θ_{i5} =270°. Поединечните криви на грешка во овој интервал се во против – фаза во однос на кривите добиени за вредности на θ_{i5} помеѓу 0° и 180°. Кога θ_{i5} е различен од 0° или 180°, грешките кои ги прави броилото неколкукратно ги надминуваат декларираните граници на грешка, согласно препораката OIML R 46-2 & 1:2012 [28].



Слика 5.2 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%} = 10$ %, $i_{5,\%} = 40$ %, $\theta_{u5} = 0^{\circ}$

Од осумте сета мерни податоци може да се заклучи дека грешките се минимални кога напоните и струите со фреквенција од 50 Hz се меѓусебно во фаза, а максималното отстапување во овие мерни точки не надминува $\pm 0,7$ %, т.е. истото е помало од максимално дозволените граници на грешка [28]. Екстремни релативни грешки се регистрирани во крајните точки од секој мерен сет и тие достигнуваат вредности од ± 16 % кога θ_{i5} е 90° или 270°.

На Слика 5.3, прикажани се грешките од тестирањето, добиени во рамките на првата испитна процедура, во апсолутна форма, со цел математичко моделирање на одзивот на броилото. Се забележува дека поединечните криви на грешка може да се апроксимираат со синусна математичка функција. Нивната периода е константна, независно од вредноста на θ_{i5} , и истата изнесува 72°, односно е 5 пати помала од периодата на сигналите со фундаментална фреквенција. Аналитички, зависноста помеѓу апсолутната грешка во мерењето, ΔP , и фазниот агол помеѓу фундаменталните напони и струи, φ_1 , може да се претстави со следниот израз:

$$\Delta P = K_1 \sin(5\varphi_1) \,, \tag{5.4}$$

каде што K_1 е амплитудата на поединечните криви на грешка, и истата зависи од вредноста на θ_{i5} , имајќи предвид дека останатите хармониски параметри на сигналите се одржуваат на константна вредност во рамките на целокупната процедура.



Слика 5.3 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$

5.3. Резултати од процедура која одговара на променлив почетен фазен агол на напонски хармоник, θ_{u5}

Во втората мерна процедура, вишите хармоници од 5^{ти} ред поседуваат идентичен удел во брановите облици на сигналите, како во првата тест процедура. Разликата е во тоа што, почетното фазно поместување на 5^{тиот} струен хармоник, θ_{i5} , се одржува на константна вредност од 60°, а почетниот фазен агол на напонскиот хармоник од 5^{ти} ред, θ_{u5} , е параметар чијашто вредност ги дефинира поединечните под – процедури. Во рамки на втората испитна процедура, направени се осум серии мерења, во кои θ_{u5} ги добива следните вредности: 0°, 60°, 90°, 120°, 180°, 210°, 270°, 300°. На Слика 5.4, прикажани се резултатите од мерењето, во форма на релативни грешки, δ_P , во функција од фазните агли помеѓу фундаменталните компоненти, φ_1 . Секоја крива на грешки, $\delta_P = f(\varphi_1)$, се однесува на различна вредност за θ_{u5} .

Од Слика 5.4 може да се забележи дека минимална амплитуда поседува кривата на грешка која одговара на θ_{u5} =60°. Максималните отстапувања во конкретната под – процедура достигнуваат вредности од ±1,1 %. Слично како кај резултатите од првата испитна процедура, и овде, во најголемиот дел мерни точки од преостанатите под – процедури, отстапувањето на броилото, во однос на референтната активна моќност, е надвор од дозволените граници на грешка [28]. Имајќи предвид дека фазниот агол на 5^{тнот} струен хармоник, θ_{i5} , има константна вредност од 60°, во текот на сите мерења, може да се заклучи дека амплитудата на грешките не зависи од поединечните вредности на θ_{i5} и θ_{u5} , туку од нивната разлика, θ_{i5} - θ_{u5} . Според тоа, разликата помеѓу измерената и референтната

активна моќност ќе биде минимална кога θ_{i5} - θ_{u5} е 0°, односно 180°, или во конретниот случај доколку θ_{u5} изнесува 60°, односно 240°. Од друга страна, кривите на грешка ќе имаат максимална амплитуда, кога разликата помеѓу фазните агли на вишите хармоници од 5^{ти} ред изнесува 90°, односно 270°, а тоа одговара на вредност за θ_{u5} од 330°, односно 150°. Дел од наведените вредности не се опфатени во спроведената процедура, меѓутоа преку споредба на кривите илустрирани на Слика 5.2 и Слика 5.4, кои одговараат на исти фазни разлики θ_{i5} - θ_{u5} , може да се потврдат конкретните заклучоци. За секоја под – процедура грешките се минимални, доколку сигналите со фреквенција од 50 Hz се меѓусебно во фаза, додека максимални отстапувања се регистрирани кога φ_1 =±60°, и истите достигнуваат вредности од ±14 %.



Слика 5.4 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%} = 10$ %, $i_{5,\%} = 40$ %, $\theta_{i5} = 60^{\circ}$

На Слика 5.5, поединечните криви на грешка се претставени во апсолутен облик, $\Delta P = f(\varphi_1)$. Од конкретната слика може да се потврди синусната форма на кривите на грешка и нивната периода од 72°, за различни вредности на φ_1 . Резултатите од втората тест процедура, ја валидираат примената на аналитичкиот израз (5.4), кој претставува основа за детерминирање на одзивот на броилото, во несинусни услови.

За да се одреди зависноста $K_1=f(\theta_{i5}-\theta_{u5})$, резултатите од направените мерења во првите две испитни процедури се групираат во дополнителен сет, во кој истите се прикажуваат како засебни криви на грешка, за различни вредности на фундаменталниот фазен агол, φ_1 . Со конкретното прегрупирање се добиваат девет криви на грешка, $\Delta P=f(\theta_{i5}-\theta_{u5})$, и истите се илустрирани на Слика 5.6. Од Слика 5.6 може да се заклучи дека поединечните криви може да се апроксимираат со синусна функција, чијашто периода изнесува 360°. Со конкретниот приказ се потврдуваат заклучоците од направените мерења во првите две процедури, дека максимални отстапувања се регистрирани кога разликата $\theta_{i5}-\theta_{u5}$, изнесува 90° или -90°, додека грешките се минимални кога разликата $\theta_{i5}-\theta_{u5}$. Најголеми амплитуди, поседуваат кривите на грешка кои одговараат на фундаментален фазен агол φ_1 од ±15°, што соодветствува со врвните вредности на кривите илустрирани на Слика 5.3 и Слика 5.5. Доколку се направат мерења во потесен интервал за φ_1 , се очекуваат криви на грешка со уште поголеми амплитуди, за вредности на φ_1 од ±18°. На спротивниот крај од спектарот, уште еднаш се потврдуваат минималните отстапувања, кога фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза. Согласно резултатите, илустрирани на Слика 5.6, изразот (5.4) го добива следниот облик:

$$\Delta P = K_2 \sin(5\varphi_1) \sin(\theta_{i5} - \theta_{\mu 5}), \qquad (5.5)$$

каде што K_2 е компонента на грешката која зависи од останатите параметри на тест сигналите. За математичка евалуација на K_2 , во продолжение, ќе бидат прикажани резултати од спроведено испитување на броилото со сигнали со променлив удел на струјниот и напонскиот хармоник од 5^{ти} ред.



Слика 5.5 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_u 5, $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$



Слика 5.6 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, ∆*P*=*f*(θ_{i5} - θ_{u5}), за различни вредности на φ_1 , $u_{5,\%}$ =10 %, $i_{5,\%}$ =40 %

5.4. Резултати од процедура која одговара на променлив удел на струен хармоник, *i*_{5,%}

Во третата тест процедура, броилото [85] одново се испитува со трифазни симетрични напони и струи, кои покрај компонентите со фреквенција од 50 Hz, поседуваат виши хармоници од 5^{тн} ред. Напонскиот хармоник поседува амплитуда, која е еднаква на 10 % од амплитудата на фундаменталниот напон и е во фаза со него, при минување низ нулата на поединечните компоненти во моментот на почеток на позитивната полупериода. Струјниот хармоник од 5^{тн} ред фазно доцни за 60° во однос на фундаменталната струја, а промената на неговиот релативен удел ги дефинира поединечните под – процедури. Уделот на компонентата на струјата со фреквенција од 250 Hz, *i*_{5,%}, се менува во интервалот од 20 % до 40 %, со чекор од 5 %, па како резултат на оваа промена се добиваат пет криви на грешка. Поединечните криви на грешка, кои го прикажуваат релативното отстапување на покажувањето на броилото, во однос на референтната активна моќност, во функција од фундаменталниот фазен агол, $\delta_P = f(\varphi_1)$, се прикажани на Слика 5.7.



Слика 5.7 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, θ_u 5=0°, θ_i 5=60°

Од Слика 5.7 може да се воочи дека кривите на грешка, кои одговараат на различна вредност за $i_{5,\%}$, имаат идентичен облик и се меѓусебно во фаза. Нивните амплитуди линеарно зависат од амплитудата на струјниот хармоник од 5^{ти} ред, што може да се утврди од снимениот континуиран пораст на отстапувањата во мерните точки кои одговараат на ист фазен агол φ_1 . Грешките кога фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза се минимални и истите варираат помеѓу -0,11 % и -0,37 %, кога $i_{5,\%}$ се менува помеѓу 20 % и 40 %. Максимални грешки се регистрирани во мерните точки кои одговараат на $\varphi_1=\pm60^\circ$. Во случај кога фундаменталниот напон доцни зад струјата со фреквенција од 50 Hz, за фазен агол од 60°, δ_P се менува помеѓу 5,9 % и 12,5 %, за целокупниот опсег на промена на уделот на струјниот хармоник од 5^{ти} ред. Во мерните точки кои одговараат на $\varphi_1=60^\circ$, грешките се движат помеѓу -6 % и -11,75 %, при истиот интервал на промена на $i_{5,\%}$.

Дополнителна потврда за линеарната зависност помеѓу измерените грешки и уделот на вишиот струен хармоник од 5^{ти} ред е презентирана на Слика 5.8 и Слика 5.9. На Слика 5.8

прикажани се кривите на грешка во апсолутен облик, $\Delta P = f(\varphi_1)$, и од нив може да се потврди валидноста на изразот (5.5), за моделирање на отстапувањата со синусна функција, чијашто периода изнесува 72°. На Слика 5.9, резултатите од третата процедура се прикажани во поинаков формат, како апсолутни грешки при мерењето активна моќност, во функција од уделот на струјниот хармоник од 5^{ти} ред. Конкретната илустрација потврдува дека зависноста $\Delta P = f(i_{5,\%})$ е линеарна за било која вредност на φ_1 . Доколку поединечните прави, кои одговараат на различен фундаментален фазен агол, се продолжат и за помали вредности на $i_{5,\%}$, во точката која одговара на чисто синусен струен сигнал, т.е. кога $i_{5,\%}=0$ %, грешката ќе биде приближно еднаква на нула. Финалниот заклучок од овој сет мерења е дека линеарноста се пренесува и на ефективната вредност на вишиот струен хармоник, имајќи ја предвид директната пропорционалност помеѓу $i_{5,\%}$ и I_5 , равенка (2.4).



Слика 5.8 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$



Слика 5.9 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(i_{5,\%})$, за различни вредности на φ_1 , $u_{5,\%}=10$ %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$

5.5. Резултати од процедура која одговара на променлив удел на напонски хармоник, *u*_{5,%}

Четвртиот сет резултати произлегува од спроведената мерна процедура, која одговара на варијабилен удел на напонскиот хармоник од 5^{тн} ред, $u_{5,\%}$, во трифазните напонски тест сигнали. Интензитетот на $u_{5,\%}$ се менува помеѓу 2,5 % и 10 %, со чекор од 2,5 %, што укажува на спроведени четири под – процедури. Вредностите на останатите параметри на вишите хармоници во тест сигналите се константни во текот на сите мерења. Уделот на 5^{тнот} хармоник во трифазните струи е еднаков на 40 % од вредноста на струјата со фреквенција од 50 Hz. Вишите хармоници поседуваат константно почетно фазно поместување во однос на фундаменталните напони и струи и истото изнесува $\theta_{u5}=0^{\circ}$, односно $\theta_{i5}=60^{\circ}$. Отстапувањата на покажувањето на броилото [85], во однос на референтната активна моќност генерирана со лабораторискиот секундарен еталон, CALMET C300 [68], изразени во релативен облик, во функција од фундаменталниот фазен агол, $\delta_P = f(\varphi_1)$, се прикажани на Слика 5.10.



Слика 5.10 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни вредности на $u_{5,\%}$, $i_{5,\%} = 40$ %, $\theta_u = 0^\circ$, $\theta_i = 60^\circ$

Од Слика 5.10, може да се утврди линеарната зависност помеѓу грешките и уделот на напонскиот хармоник од 5^{ти} ред. Слично како и кај резултатите од тест процедурата со променлив удел на струјниот хармоник, и овде, линеарноста се утврдува преку униформното поместување на отстапувањата во мерните точки кои соодветствуваат на ист фундаментален фазен агол, φ_1 . Поединечните криви на грешка поседуваат идентичен облик, за различен интензитет на напонскиот хармоник, што укажува дека промената на $u_{5,\%}$, влијае единствено на промената на параметарот K_2 , од изразот (5.5). Отстапувањата се повторно минимални кога $\varphi_1=0^\circ$, нивниот интензитет се менува во интервалот помеѓу 0,02 % и -0,37 %, во зададениот опсег на промена на $u_{5,\%}$. Најголеми грешки се регистрирани во мерните точки кои одговараат на најголемо фазно поместување помеѓу фундаменталните компоненти, т.е. кога $\varphi_1=\pm60^\circ$. Во подрачјето на капацитивно оптоварување, максималното отстапување се движи помеѓу 3,13 % и 12,5 %, додека кога соs $\varphi_1=0,5$ L, δ_P се менува помеѓу -3,1 % и -11,75 %. На Слика 5.11 и Слика 5.12, прикажани се резултатите од тест процедурата во форма на апсолутни грешки, $\Delta P = f(\varphi_1)$ и $\Delta P = f(u_{5,\%})$, соодветно. Овие две илустрации се користат за надополнување на математичкиот модел за приказ на отстапувањата, со заклучоците кои се однесуваат на промената на напонскиот хармоник од 5^{тн} ред. Слично како при анализата на резултатите од процедурата со варијабилен струен хармоник, и овде може да се потврди линеарната зависност помеѓу ΔP и U_5 . Последново е експлицитно прикажано на Слика 5.12, каде што мерните резултати се прегрупирани во однос на различните вредности за φ_1 . Доколку се продолжат поединечните прави, за да се опфатат и помали вредности за $u_{5,\%}$, се доаѓа до заклучок дека сите прави минуваат низ или во непосредна близина на координатниот почеток, при чисто синусни напонски тест сигнали.



Слика 5.11 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, Δ*P*=f(φ₁), за различни вредности на и5,%, i5,%=40 %, θ_u5=0°, θ_i5=60°



Слика 5.12 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, Δ*P*=*f*(*u*5,%), за различни вредности на φ₁, *i*5,%=40 %, θ_u5=0°, θ_i5=60°

Имајќи ги во предвид заклучоците од последните две тест процедури, изразот за математички приказ на грешките, равенка (5.5), може да се прошири со ефективните вредности на вишите хармоници од $5^{\text{ти}}$ ред:

$$\Delta P = K_3 [3U_5 I_5 \sin(5\varphi_1) \sin(\theta_{i5} - \theta_{u5})], \qquad (5.6)$$

каде што факторот на мултипликација 3 се однесува на фактот дека тестирањето е спроведено во трифазен урамнотежен систем, а K_3 е коефициент кој не зависи од ниту еден од досега менуваните хармониски параметри на сигналите. Неговата вредност може приближно да се одреди доколку апсолутните грешки, ΔP , добиени пресметковно со изразот (5.3), за секоја мерна точка, се поделат со делот од равенката (5.6), кој се однесува на познатите параметри на сигналите. Согласно спроведената пресметка, која ги опфаќа сите мерни резултати, добиена е вредност за коефициентот K_3 приближно еднаква на 2, во секоја мерна точка. Според тоа, математичкиот приказ на апсолутните грешки, кога броилото се испитува со трифазни напони и струи кои, покрај фундаменталните компоненти, поседуваат и виши хармоници со фреквенција од 250 Hz, го добива следниот облик:

$$\Delta P = \Delta P_5 = 3[2U_5 I_5 \sin(5\varphi_1) \sin(\theta_{i5} - \theta_{u5})], \qquad (5.7)$$

каде што индексот 5 во ознаката за апсолутна грешка укажува на фактот дека тестирањето е спроведено со сигнали во кои фигурираат виши хармоници од 5^{ти} ред.

5.6. Резултати од процедура која одговара на променлив ред, *h*, на вишите хармоници во тест сигналите

Во последната тест процедура, броилото [85] се испитува со сигнали во кои фигурираат виши хармоници со константен удел, $u_{h,\%}=10$ % и $i_{h,\%}=40$ %, и константно почетно фазно поместување, $\theta_{uh}=0^{\circ}$ и $\theta_{ih}=60^{\circ}$, од различен ред, h, т.е. со различна фреквенција, hf_1 ($f_1=50$ Hz). Редот на вишите хармоници ги детерминира поединечните под – процедури, па во конкретната испитна постапка спроведени се четири сета мерења со непарни хармоници од 5^{ти} до 11^{ти} ред. Резултатите од тестирањата, во форма на релативни грешки, $\delta_P=f(\varphi_1)$, и апсолутни грешки, $\Delta P=f(\varphi_1)$, се прикажани на Слика 5.13 и Слика 5.14, соодветно.

Од резултатите прикажани на Слика 5.13 и Слика 5.14 може да се извлечат последните заклучоци кои се релевантни за математичкото моделирање на отстапувањата на броилото. Имено, поединечните криви на грешка, можат да се апроксимираат со синусни функции, чијашто периода, T_h , е обратно пропорционална на редот на хармониците присутни во сигналите:

$$T_h = \frac{360^\circ}{h}.\tag{5.8}$$

Поради различната периода на кривите на грешка, максималните отстапувања се регистрирани во мерни точки кои соодветствуваат на различен фундаментален фазен агол, φ_1 . Според Слика 5.13, максималните грешки, во сетот мерења кој се однесува на тест сигнали со виши хармоници од 7^{ми} ред, се регистрирани за φ_1 =±60° и истите изнесуваат

-12,2 % при капацитивно, односно 12,3 % при индуктивно оптоварување. Кога броилото се испитува со тест сигнали кои поседуваат виши хармоници со фреквенција од 450 Hz, максималните отстапувања се регистрирани за фазни агли од -50° и 50°, а истите изнесуваат -10,75 % и 12,11 %, респективно. Во под – процедурата во која фигурираат виши хармоници од 11^{ти} ред, најголеми грешки се измерени во мерните точки кои се однесуваат на φ_1 =-55° и φ_1 =60°, и истите се еднакви на 13,41 %, односно -12,82 %.



Слика 5.13 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници, h, $u_{h,\%} = 10$ %, $i_{h,\%} = 40$ %, $\theta_{uh} = 0^\circ$, $\theta_{ih} = 60^\circ$



Слика 5.14 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници, h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $\theta_{uh}=0^{\circ}$, $\theta_{ih}=60^{\circ}$

Ако се анализираат поединечните зависности $\Delta P = f(\varphi_1)$ од Слика 5.14, може да се утврди дека кривите на грешка поседуваат константна амплитуда, со што се потврдуваат заклучоците од претходните сетови тестирања. Имено, кога грешките во мерењето се изразени во функција од фазниот агол помеѓу фундаменталните напони и струи, φ_1 ,
амплитудата на поединечните криви на грешка зависи од ефективната вредност на вишите хармоници и нивните почетни фазни поместувања, параметри кои се одржуваат на константна вредност во сите четири под – процедури од конкретното испитување.

Со помош на резултатите прикажани на Слика 5.13 и Слика 5.14 може да се воопшти аналитичкиот израз за квантитативен приказ на отстапувањата при мерењето активна моќност, во случај кога уредот се испитува со тест сигнали, кои, покрај фундаменталните компоненти, поседуваат еден сет виши хармоници од ред h. Со други зборови, во општ случај, изразот (5.7) преминува во:

$$\Delta P_h = 3[2U_h I_h \sin(h\varphi_1) \sin(\theta_{ih} - \theta_{uh})], \qquad (5.9)$$

каде што сите параметри со индекс *h* се однесуваат на хармониските компоненти од конкретниот ред.

5.7. Резултати од дополнителни сетови мерења за верификација на математичкиот модел

За да се покаже дека изразот (5.9) може да се употреби за илустрација на отстапувањата кај било кој дигитален инструмент за мерење активна електрична моќност и/или енергија, при различни оптоварувања, во продолжение ќе бидат прикажани резултати од два дополнителни сета мерења. Мерната конфигурација е потполно идентична како во претходното изложување. Хармониски – изобличените тест сигнали се генерираат со лабораторискиот секундарен еталон, CALMET C300 [68], а мерењето е спроведено со усвојување трифазни симетрични услови.

Резултатите од првиот дополнителен сет мерења повторно се однесуваат на испитување на истото броило, Landys+Gyr ZMD405CT44.2407 [85], со тест сигнали, кои, покрај фундаменталните напони и струи, поседуваат виши хармоници од 5^{ти} ред, со следниот релативен удел и почетно фазно поместување: $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$ и $\theta_{i5}=60^{\circ}$. Како променлив параметар, во однос на кој ќе се моделираат отстапувањата, се јавува ефективната вредност на применетата струја, І. Направени се четири сета мерења, за струи еднакви на 10 %, 20 %, 50 % и 100 % од вредноста на номиналната струја на броилото. Резултатите се прикажани на Слика 5.15 и Слика 5.16, како релативни и апсолутни грешки во функција од фазниот агол помеѓу фундаменталните компоненти. Од сликите може да се потврди применливоста на изразот за математичко моделирање на отстапувањата, (5.9), при различни струи во горенаведениот опсег. При илустрација на релативните грешки, Слика 5.15, поединечните криви на грешка се преклопуваат. Ова укажува дека степенот на отстапување за исти фазни агли, φ_1 , при различни испитни струи, *I*, е речиси идентичен. Колку е поголема испитната струја, толку е поголема и ефективната вредност на 5^{тиот} струен хармоник, па согласно изразот (5.9), поголема ќе биде и разликата помеѓу измерената и референтната моќност, изразена во апсолутен облик, Слика 5.16.

Вториот дополнителен сет мерења, се однесува на споредба помеѓу одзивот на четири инструменти за мерење активна моќност и/или енергија во несинусни услови. Три од четирите инструменти се дигитални броила за активна енергија. Покрај уредот кој беше искористен во досегашната анализа, Landys+Gyr ZMD405CT44.2407 [85], се регистрираат грешките и за две други броила, од различна класа на точност:

- Landys+Gyr ZMD310CT44.0000 [86], броило за активна енергија за директно поврзување, од класа на точност 1 (В), 3·220 V/ 380 V, 20 A, 50 Hz,
- ISKRA MT173 [87] броило за активна енергија за директно поврзување, од класа на точност 2 (A), 3·220 V/ 380 V, 10 A, 50 Hz.

Последниот уред е лабораторискиот примарен еталон, во доменот на мерење електрична моќност и енергија, ZERA COM3003 [83], трифазен компаратор од класа на точност 0,01.



Слика 5.15 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различна ефективна вредност на испитната струја, I, $u_{5,\%} = 10$ %, $i_{5,\%} = 40$ %, $\theta_{u5} = 0^{\circ}$, $\theta_{i5} = 60^{\circ}$



Слика 5.16 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различна ефективна вредност на испитната струја, I, $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$

За анализа на грешките кај четирите инструменти, применети се истите тест сигнали како во претходната постапка. Имено, во трифазните напони и струи, покрај компонентите со фундаментална фреквенција, фигурираат и виши хармоници од 5^{ти} ред, со следниот удел (амплитуда) и почетно фазно поместување: $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$ и $\theta_{i5}=60^{\circ}$. За секој

испитуван инструмент направени се мерења во девет мерни точки, кои се однесуваат на различна вредност за фазниот агол помеѓу фундаменталните компоненти, φ_1 , во интервалот помеѓу -60° и 60°, со чекор од 15°. Тестирањето на трите броила [85-87] е спроведено со напони и струи, чиишто ефективни вредности се еднакви со номиналните параметри на уредите. Примарниот еталон [83], се испитува со напони и струи еднакви на 220 V и 5 A, на мерни подрачја од 240 V и 10 A, соодветно. Резултатите од мерната постапка, во форма на релативни и апсолутни грешки, во функција од фундаменталниот фазен агол, $\delta_P = f(\varphi_1)$ и $\Delta P = f(\varphi_1)$, се прикажани на Слика 5.17 и Слика 5.18, респективно.



Слика 5.17 Релативни грешки при мерењето активна моќност, $\delta_P = f(\varphi_1)$, за различни мерни уреди, $u_{5,\%} = 10$ %, $i_{5,\%} = 40$ %, $\theta_{u5} = 0^\circ$, $\theta_{i5} = 60^\circ$



Слика 5.18 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, за различни мерни уреди, и5,%=10 %, i5,%=40 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$

Валидноста на математичкиот модел, равенка (5.9), за приказ на отстапувањата кај различни уреди за мерење активна моќност и/или енергија, кога во влезните сигнали фигурираат виши хармоници од само еден ред, може да се потврди преку прикажаното на Слика 5.17 и Слика 5.18. Кривите на грешка кои произлегуваат од испитувањето различни инструменти, можат да се апроксимираат со синусна математичка функција во однос на φ_1 , чијашто периода е обратно пропорционална на редот на хармониците, присутни во применетите напони и струи. Имајќи предвид дека конкретните тест сигнали содржат само хармоници од 5^{тн} ред, периодата на поединечните криви на грешка изнесува 360°/5=72°.

Од Слика 5.17 може да се утврди дека кривите на грешка, $\delta_P = f(\varphi_1)$, кои произлегуваат од испитувањето на двете броила од производителот Landys+Gyr, [85] и [86], како и онаа која произлегува од тестирањето на примарниот еталон на ЛЕМ, ZERA COM3003 [83], речиси се преклопуваат. Ова се должи на фактот што грешките кај овие уреди, во синусен работен режим се мали, па речиси целокупното регистрирано отстапување е резултат на присуството на вишите хармоници. Кривата на грешка, која се однесува на последното броило, ISKRA MT173 [87], е поместена во однос на апцисната оска, и ова е резултат, пред се, на фактот што ова броило претставува инструмент од пониска класа на точност, кај кој и интринсичните отстапувања се очигледно поголеми. Кај трите уреди од повиска класа на точност, измерени се минимални грешки помеѓу -0,12 % и -0,54 % кога фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза. Максималните регистрирани отстапувања, при 60° капацитивно оптоварување се движат помеѓу 12,3 % и 12,7 %, додека при $\cos \varphi_1 = 0,5$ L, за овие три уреди, детектирани се грешки, чијшто интензитет се менува помеѓу -11,46 % и -11,75 %. Минималното отстапување кај преостанатото броило [87] изнесува -1,49 %, за *φ*₁=0°, додека грешките измерени при фундаментални фазни агли од -60° и 60° изнесуваат 10,51 % и -12,04 %, респективно. Може да се заклучи дека при $\cos \varphi_1 = 1$, сите три броила грешат во рамките на максимално дозволените граници на грешка, кои, при хармониски – изобличени сигнали, изнесуваат ± 3 %, ± 1.6 % и ± 0.8 %, за броилата од класа A, B и C, соодветно [28]. Кога $\varphi_1 = \pm 60^\circ$, измерените отстапувања, како и во сите испитни постапки прикажани досега, се неколкукратно поголеми од границите на грешка, презентирани во [28]. Ако се анализираат грешките прикажани во апсолутен облик, Слика 5.18, може да се утврди дека најголеми отстапувања се регистрирани при спроведеното тестирање на броилото Landys+Gyr ZMD310CT44.0000 [86]. Ова се должи на фактот што ова броило се испитува со најголеми напони и струи, U=220 V и I=20 A, па оттука најголема амплитуда поседуваат и вишите хармоници од 5^{ти} ред, кои директно влијаат на големината на грешката, согласно равенката (5.9). Од друга страна, најмали отстапувања во апсолутен облик се регистрирани при тестирање на броилото Landys+Gyr ZMD405CT44.2407 [85], имајќи предвид дека истото се испитува со напони и струи, чиишто ефективни вредности изнесуваат 58 V и 5 А.

5.8. Математички модел за приказ на грешките при случајни хармониски изобличувања и негова валидација

Равенката (5.9) ги прикажува отстапувањата на еден трифазен уред за мерење активна моќност и/или енергија, при симетрични услови, кога во фреквенцискиот спектар на применетите напони и струи фигурираат виши хармоници од само еден ред. Овој израз треба да се воопшти, за да можат со него да се моделираат грешките при случајни

хармониски изобличувања на влезните сигнали. Доколку се појде од заклучокот, според кој во изразот (5.9) фигурираат само параметрите на вишите хармоници од ред h и фундаменталниот фазен агол, φ_1 , односно фактот дека не постојат дополнителни корелации помеѓу вишите хармоници и напоните, односно струите, со фреквенција од 50 Hz, може да се предложи општа аналитичка формулација за приказ на отстапувањата, базирана на принципот на суперпозиција:

$$\Delta P_{\Sigma} = 3 \sum_{h>1}^{n} 2U_h I_h \sin(h\varphi_1) \sin(\theta_{ih} - \theta_{uh}) . \qquad (5.10)$$

Во равенката (5.10) е усвоено дека вкупната грешка е еднаква на аритметичката сума од грешките кои произлегуваат од присуството на поединечни парови напонски и струјни виши хармоници и истата е валидна за трифазен симетричен режим на мерење. Доколку станува збор за несиметрични услови, потребно е да се одреди сумата од отстапувањата на различни фреквенции, за секоја фаза поединечно. Активната моќност која се генерира со референтниот уред [68] е пресметана согласно изразите (2.17) и (2.19), повторно усвојувајќи трифазен урамнотежен систем. Доколку се примени равенката (5.2), тогаш активната моќност која ја регистрира испитуваниот уред изнесува:

$$P_{UUT} = P_{C300} + \Delta P_{\Sigma} =$$

= $3 \sum_{h=1}^{n} U_h I_h \cos \varphi_h + 3 \sum_{h>1}^{n} 2U_h I_h \sin(h\varphi_1) \sin(\theta_{ih} - \theta_{uh}).$ (5.11)

Изразот (5.10), кој ја прикажува грешката во трифазен симетричен режим на испитување, може да се преформулира со користење на познат тригонометриски идентитет [88]:

$$\sin\alpha\sin\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)], \qquad (5.12)$$

и доколку за α се замени $h\varphi_1$, а за β се замени разликата помеѓу почетните фазни поместувања на вишите хармоници од ред h, θ_{ih} - θ_{uh} , истиот го добива следниот облик:

$$\Delta P_{\Sigma} = 3 \sum_{h>1}^{n} U_{h} I_{h} [\cos(h\varphi_{1} - \theta_{ih} + \theta_{uh}) - \cos(h\varphi_{1} + \theta_{ih} - \theta_{uh})] =$$

$$= 3 \sum_{h>1}^{n} U_{h} I_{h} [\cos(h\varphi_{1} - \theta_{ih} + \theta_{uh}) - \cos\varphi_{h}].$$
(5.13)

Во равенката (5.13), фазниот агол помеѓу напонските и струјните виши хармоници од ред h, φ_h , се пресметува согласно изразот (2.15). Конечно, доколку равенката (5.13) се замени во изразот (5.11), трифазната активна моќност, која ја регистрира мерниот инструмент, аналитички може да се прикаже како:

$$P_{UUT} = P_{1,3f} + 3\sum_{h>1}^{n} U_h I_h \cos[h\varphi_1 - (\theta_{ih} - \theta_{uh})] = P_{1,3f} + 3\sum_{h>1}^{n} U_h I_h \cos\varphi'_h, \qquad (5.14)$$

каде што $P_{1,3f}$ е трифазната фундаментална активна моќност, а фазниот агол помеѓу вишите хармоници на напонот и струјата од ред h, φ'_h , се пресметува како:

$$\varphi_h' = h\varphi_1 - (\theta_{ih} - \theta_{uh}). \tag{5.15}$$

Од изразите (5.13) и (5.14) можат да се извлечат два важни заклучоци. Имено, еден инструмент за мерење активна моќност и/или енергија, базиран на дигитално процесирање сигнали, при хармониски – изобличени услови, ќе мери со минимална дополнителна грешка, во однос на неговото интринсично отстапување, само доколку фундаменталните напони и струи, U_1 и I_1 , се меѓусебно во фаза, т.е доколку $\varphi_1=0^\circ$. Согласно равенките (5.10) и (5.13), конкретниот заклучок е валиден за секое случајно изобличување на напоните и струите, без разлика на бројот на виши хармоници присутни во сигналите, нивниот релативен удел и почетно фазно поместување. Според истите два изрази, грешките ќе бидат минимални и во случај кога U_1 и I_1 се меѓусебно фазно поместени, т.е. кога $\varphi_1 \neq 0^\circ$, но само доколку вишите хармоници се во фаза или во противфаза со фундаменталните напони и струи, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти, во моментот на почеток на позитивната полупериода. Вториот заклучок се однесува на равенките (5.14) и (5.15), односно на начинот на кој инструментот ги регистрира вишите хармоници. Имено, точната вредност за фазниот агол помеѓу напоните и струите со фреквенција h пати поголема од фундаменталната се пресметува согласно изразот (2.15). Според равенките (5.14) и (5.15), фазните агли на вишите хармоници во однос на фундаменталните компоненти имаат спротивна ориентација, гледано од перспектива на мерниот инструмент. Тоа би значело дека уредот за мерење активна моќност и/или енергија ги регистрира вишите хармоници како компоненти чиишто фазори имаат спротивна насока на ротација во однос на фундаменталните напони и струи. Последниот заклучок е доста важен за категоризација на отстапувањата, кои се аналитички моделирани врз основа на резултатите од експерименталната анализа. Јасно е дека грешките претставени со изразот (5.13), се однесуваат исклучиво на мерниот алгоритам имплементиран во испитуваниот инструмент. Самата равенка (5.13) во себе не содржи информација за дополнителни грешки кои се евентуално присутни поради влијанието на вишите хармоници врз колата за прилагодување на влезните сигнали кај инструментите или постоењето несиметријата кај тест сигналите.

Дополнителните мерни процедури, прикажани во претходното изложување, беа спроведени заради валидација на математичкиот модел за приказ на апсолутните грешки при мерењето активна моќност, кога во тест сигналите фигурира само еден пар виши хармоници од ист ред, (5.9). За да се спроведе валидација на општиот израз за приказ на грешките, кои произлегуваат од имплементираниот алгоритам за мерење во испитуваниот уред, (5.13), се применуваат тест сигнали со случајно хармониско изобличување. Примарниот еталон на Лабораторијата, ZERA COM3003 [83], е употребен како инструмент за реализација на валидациската постапка. Овој уред, во анализата која следува, има двојна функција. Истиот е примарно употребен во конфигурација на трифазен ватметар за мерење активна моќност, при случајни хармониски изобличувања. На тој начин, со конкретниот уред би се снимиле реалните отстапувања, кои се резултат на спротивната насока на

ротација на фазорите на вишите хармоници. Дополнително, овој еталон се применува и како анализатор за квалитет на електрична енергија, односно се употребува во својство на референтен инструмент за контрола на интензитетот и фазните поместувања на поединечните виши хармоници, генерирани со CALMET C300 [68].

За валидација на општиот приказ на грешките, кои се резултат на имплементираниот мерен алгоритам во различни дигитални инструменти, се применуваат три сета мерни сигнали. Она што е заедничко за истите е дека вкупното хармониско изобличување е ограничено на 10 %, за напонските сигнали, односно на 40 %, за струјните сигнали. За секој сет тест сигнали, направени се мерења во девет мерни точки и истите одговараат на фазни поместувања помеѓу фундаменталните компоненти, од -60° до 60°, со чекор од 15°. Во трите сета сигнали фигурираат исклучиво непарни хармоници до 11^{ти} ред, а уделот и почетното фазно поместување на секој напонски и струен хармоник, се прикажани во Табела 5.2.

Секој сет од предложените тест сигнали се карактеризира со различен степен на хармониско изобличување и претставува лабораториска симулација на различен феномен од реалната електроенергетска пракса. Првиот сет тест сигнали се однесува на големо хармониско изобличување, присутно во нисконапонски систем, кога инструментот е наменет за директна или полуиндиректна конфигурација на поврзување. Ефективната вредност на применетите напони и струи изнесува U=230 V и I=5 A, за сите три фази. Вториот сет сигнали се однесува на помало изобличување, како што може да се забележи од нагодувањата илустрирани во Табела 5.2, имено THD_U=5,65 %, а THD_I=26,83 %. Оваа лабораториска симулација се однесува на изобличувања присутни во високонапонска или среднонапонска мрежа, пренесени на секундарната страна од мерните трансформатори, имајќи предвид дека ефективните вредности на напоните и струите изнесуваат U=58 V, односно I=1 А. Последниот сет тест сигнали, употребен за валидација на математичкиот модел за приказ на грешките, се однесува повторно на релативно високо хармониско изобличување во нисконапонски систем. Она што е карактеристично за овие напони и струи е отсуството на тројни хармоници (во конкретната шема на тестирање тоа се третиот и деветтиот хармоник на напонот, односно струјата). Ефективните вредности на применетите сигнали изнесуваат U=230 V и I=20 A, респективно.

	Прв сет тест сигнали			Втор сет тест сигнали			Трет сет тест сигнали					
h	и _{h,%} (%)	$ heta_{uh}$ (°)	i _{h,%} (%)	$ heta_{ih}$ (°)	u _{h,%} (%)	$ heta_{uh}$ (°)	i _{h,%} (%)	$ heta_{ih}$ (°)	u _{h,%} (%)	$ heta_{uh}$ (°)	i _{h,%} (%)	$ heta_{ih}$ (°)
3	8,2	65	34,9	119	5,22	63	23,15	17	0	0	0	0
5	4,4	247	15,1	194	1,98	224	11,53	312	6,93	95	28,7	328
7	1,15	174	8,5	48	0,83	117	6,89	94	2,81	266	14,33	65
9	0,78	12	2,45	7	0,21	336	1,84	222	0	0	0	0
11	0,12	325	0,87	204	0	0	0	0	0,96	148	3,19	185
<i>THD</i> (%)	9,41		39,05		5,65		26,83		7,54		32,24	

Табела 5.2 Релативен удел и почетно фазно пом	лестување на вишите хармоници во
трите сета тест сигнали за валидација на предл	южениот математички модел

Резултатите од испитувањата, во форма на апсолутни грешки, $\Delta P = f(\varphi_1)$, се прикажани на Слика 5.19, Слика 5.20 и Слика 5.21. Секоја слика се однесува на резултати од тестирања, кои произлегуваат од примената на еден од предложените сетови хармониски – изобличени сигнали. На поединечните илустрации прикажани се по три криви на грешка, кои се однесуваат како на измерени, така и на математички моделирани, отстапувања.



Слика 5.19 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, со примарниот еталон, ZERA COM3003, при испитување со првиот сет тест сигнали



Слика 5.20 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, со примарниот еталон, ZERA COM3003, при испитување со вториот сет тест сигнали



Слика 5.21 Апсолутни грешки при мерењето активна моќност, $\Delta P = f(\varphi_1)$, со примарниот еталон, ZERA COM3003, при испитување со третиот сет тест сигнали

Првата крива на секоја од сликите, прикажана како полна линија со маркери во форма на кругови, е означена како $\Delta P_{\Sigma,Z-C}$. Истата ја претставува грешката во мерењето, односно добиените вредности одговараат на измерената разлика помеѓу трифазната активна моќност, регистрирана со ZERA COM3003 [83], P_{3003} , и генерираната моќност со CALMET C300 [68], P_{C300} :

$$\Delta P_{\Sigma,Z-C} = P_{UUT} - P_{C300} = P_{3003} - P_{C300} .$$
(5.16)

И покрај тоа што примарниот еталон на лабораторијата [83] поседува повисока класа на точност од генераторот на сигнали [68], во изразот (5.16), P_{UUT} се заменува со измерената моќност, имајќи предвид дека грешките се анализираат од перспектива на принципот на мерење, имплементиран во анализираниот уред. Секундарниот еталон поседува документирана спецификација [68] за начинот на кој се пресметуваат генерираните моќности во присуство на хармониски изобличувања, што не е случај со примарниот еталон, во доменот на мерење на конкретните величини. Втората крива на грешка, претставена како испрекината линија со правоаголни маркери и означена како $\Delta P_{\Sigma,cal}$, ги прикажува очекуваните отстапувања, пресметани согласно предложениот математички модел, равенка (5.10). За пресметка на очекуваните отстапувања, во изразот (5.10) се внесуваат нагодувањата на секундарниот еталон [68], наведени во Табела 5.2, за секој сет испитни напони и струи. За пресметка на ефективните вредности на фундаменталните и хармониските компоненти на напоните и струите, се користи основниот математички апарат за анализа на виши хармоници, равенки (2.3) – (2.12). Последната крива, прикажана со испрекината линија и триаголни маркери, и означена како $\Delta P_{\Sigma,Z-Z}$, ги претставува разликите помеѓу измерената трифазна активна моќност со примарниот еталон [83], и активната моќност, пресметана согласно изразите (2.17) и (2.18), доколку во истите се заменат измерените: ефективни вредности на трифазните напони и струи, фазни агли помеѓу фундаменталните компоненти во секоја фаза и удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници, по фаза; со истиот инструмент:

$$\Delta P_{\Sigma, Z-Z} = P_{3003} - P_{3003, pres} \,. \tag{5.17}$$

Оваа крива на грешки ги прикажува разликите помеѓу директно измерената активна моќност со примарниот еталон, *P*₃₀₀₃, и пресметковно добиената моќност, *P*_{3003,pres}, доколку уредот е искористен во конфигурација на анализатор за квалитет на електрична енергија.

Од кривите на грешка, илустрирани на сликите 5.19, 5.20 и 5.21, може да се заклучи дека, математичкиот модел за приказ на отстапувањата, кои произлегуваат од имплементираниот мерен алгоритам во дигиталните инструменти за мерење електрична моќност/енергија, равенка (5.10), е валиден за било какво случајно хармониско изобличување на мерните сигнали, кое опфаќа повеќе хармоници од различен ред, со различна амплитуда и случајно фазно поместување. Доколку се споредат кривите означени како $\Delta P_{\Sigma,Z-C}$ и $\Delta P_{\Sigma,cal}$, може да се извлече заклучок дека измерените отстапувања ја следат анвелопата на пресметковно добиените грешки, согласно изразот (5.10). Разликата помеѓу измерените и пресметковно добиените отстапувања е резултат на можноста за точна репродукција на изобличените сигнали со секундарниот еталон [68]. Имено, кривата означена како $\Delta P_{\Sigma,cal}$ е исцртана со усвојување трифазен симетричен тест систем, односно амплитудите на фундаменталните и хармониските компоненти, како и нивните фазни поместувања се земени како константни вредности за сите три фази. Во пракса постојат разлики помеѓу поединечните параметри на сигналите, особено во доменот на воспоставување фиксно фазно поместување, како помеѓу фундаменталните компоненти, така и помеѓу вишите хармоници.

Со помош на третата крива на грешки, насловена како $\Delta P_{\Sigma,Z-Z}$, може да се постигне дополнителна валидација на математичкиот модел. Резултатите од кои е исцртана оваа крива не се под влијание на постоењето фазна несиметрија и дрифт помеѓу покажувањата на двата уреди. Дополнително, со користење на ZERA COM3003 [83] во функција на анализатор за квалитет на електрична енергија се потврдува точноста и стабилноста на работењето на секундарниот еталон [68], во доменот на генерирање хармониски – изобличени сигнали.

На самиот крај од валидацијата на математичкиот модел за приказ на грешките, кои произлегуваат од имплементираниот мерен алгоритам во инструментите за мерење активна моќност/енергија, може да се извлече заклучок за обликот на поединечните криви на грешка. Имено, кривите на грешка поседуваат анвелопа со синусен бранов облик, во функција од фазниот агол помеѓу фундаменталните напони и струи, чијашто периода е обратно пропорционална на редот на хармониците со доминантен удел во мерните сигнали. Според тоа, воочливо е дека кривите илустрирани на Слика 5.19 и Слика 5.20 имаат периода од 360°/3=120°, додека кривите илустрирани на Слика 5.21 имаат периода од 360°/5=72°. Конкретниот заклучок произлегува од добиените резултати, кои соодветствуваат на девет вредности за фундаменталниот фазен агол. Доколку во испитниот протокол се опфатат повеќе мерни точки, кои се однесуваат на помал интервал на промена на φ_1 , би се добил подетален приказ за кривите на грешка, гледано од перспектива на придонесот на преостанатите виши хармоници во севкупното отстапување.

Заклучоците од ова поглавје на докторската дисертација се прикажани во трудот со реден број [4] од листата на публикации.

6. ГРЕШКИ КАЈ ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ РЕАКТИВНА МОЌНОСТ И/ИЛИ ЕНЕРГИЈА ПРИ НЕСИНУСНИ СИГНАЛИ

6.1. Воведни забелешки

Како што беше нагласено во воведното изложување од докторскиот труд, во доменот на тестирање инструменти за мерење реактивна моќност/енергија, во несинусни услови, не постојат стандардизирани мерни постапки. Постоечките стандарди, кои се однесуваат на барањата за точно мерење на конкретните електрични величини, се ограничени на синусни референтни услови [47-50], или на можностите за мерење реактивна моќност и/или енергија која произлегува исклучиво од компонентите на напоните и струите со фреквенција од 50 Hz [51]. Причините за непостоење стандардизирани испитни протоколи, кои би вклучиле хармониски — изобличени напони и струи, можат да се лоцираат примарно во нееднозначното дефинирање на поимот реактивна моќност, кое датира уште од почетоците на проучувањето на вишите хармоници [13-14]. Дополнителен проблем претставуваат и различните алгоритми за мерење, имплементирани во поединечни мерни уреди, кои резултираат со приближно идентичен одзив на мерилата во строго синусни услови, но од друга страна прикажуваат комплетно различен резултат во случај на хармониски изобличувања кај сигналите.

Во ова поглавје ќе биде детално прикажан одзивот на едно броило за реактивна енергија, во однос на различни начини на толкување на референтната реактивна моќност, во несинусни услови. Отчитувањата на испитуваниот уред ќе бидат најпрво споредени со референтната реактивна моќност, која произлегува единствено од фундаменталните компоненти на напонот и струјата, во согласност со барањата на стандардот IEEE 1459 [51]. Понатамошната анализа ќе биде спроведена со толкување на референтната големина, согласно дефинициите предложени од страна на С. Budeanu [13] и S. Fryze [14], како примарни перспективи за приказ на реактивната моќност во фреквенциски, односно временски домен [52]. Од детектираните разлики помеѓу покажувањето на броилото и зададената моќност/енергија, може да се одреди алгоритамот на мерење, кој вообичаено не е однапред деклариран од страна на производителот. Толкувањето на реактивната моќност, според различни дефиниции, е прикажано во второто поглавје од докторскиот труд, додека различните принципи на мерење на конкретната величина се претставени во третото поглавје. На крајот од оваа анализа, во мерната постапка ќе биде вклучен и примарниот еталон на лабораторијата, ZERA COM3003 [83]. Со негова помош дополнително ќе се отсликаат варијациите на отстапувањата при различни дефиниции за реактивната моќност, а ќе се анализира и можноста за истиот да се вклучи како референтен инструмент во текот на рутинска испитна постапка, спроведена врз еден уред од пониска класа на точност.

Поради недостаток на стандардизиран испитен протокол, како појдовна точка за спроведување на конкретната анализа ќе бидат применети тест сигналите, наведени во стандардот EN 50470-3 [27], наменети за испитување броила за активна енергија. Станува збор за истите тест сигнали кои се применети во постапката прикажана во претходното поглавје од докторскиот труд. Во применетите напони и струи, покрај компонентите со фреквенција од 50 Hz, фигурираат и виши хармоници од само еден ред. Снимањето на одзивот на броилото е реализирано преку пет мерни процедури. Во секоја мерна процедура, само еден параметар на вишите хармоници се менува, додека останатите имаат константна

вредност. Вредностите на променливиот хармониски параметар, ги диктираат поединечните под – процедури. Во првите четири процедури, тест сигналите поседуваат виши хармоници од $5^{\text{ти}}$ ред, а како променливи параметри фигурираат почетните фазни поместување на струјниот и напонскиот хармоник во однос на фундаменталните компоненти, θ_{i5} и θ_{u5} , како и нивните процентуални удели, $i_{5,\%}$ и $u_{5,\%}$. Во последната испитна процедура, редот на вишите хармоници се менува, додека почетните фазни поместувања и процентуални удели имаат константна вредност. Вредностите на поединечните хармониски параметри, за секоја испитна процедура, се наведени во Табела 6.1. Ознаката *вар.* подразбира дека конкретниот параметар има променлива вредност.

Испитна	Параметар на вишите хармоници					
процедура	h	$u_{h,\%}$ (%)	$i_{h,\%}$ (%)	$ heta_{uh}$ (°)	$ heta_{ih}(\degree)$	
1	5	10	40	0	вар.	
2	5	10	40	вар.	60	
3	5	10	вар.	0	60	
4	5	вар.	40	0	60	
5	вар.	10	40	0	60	

Табела 6.1	Вредности за	параметрите на	вишите хармоници	во секоја	процедура од
испитната	постапка				

Под – процедурите се состојат од по дванаесет мерни точки, каде што секоја одговара на различна вредност за фазниот агол помеѓу напоните и струите со фундаментална фреквенција, φ_1 . Мерењата се спроведени за капацитивно оптоварување на броилото, пришто φ_1 се менува помеѓу -90° и -15°, со чекор од 15°, и за индуктивно оптоварување, пришто φ_1 се менува во интервалот помеѓу 15° и 90°, со истиот чекор од 15°. Одзивот на броилото не се снима при $\varphi_1=0^\circ$, за да се постигне униформен приказ на резултатите. Имено, кога покажувањето на мерниот уред би се споредувало со генерираната фундаментална реактивна моќност, при $\varphi_1=0^\circ$, би се добила математички недефинирана вредност за измерената грешка, имајќи предвид дека во конкретната мерна точка $Q_1=0$ VAr. Деталниот приказ на испитниот протокол, односно вредностите за фундаменталните и хармониските параметри на сигналите, во секоја процедура, под – процедура и мерна точка, се илустрирани во Додадок Б, на крајот од докторската дисертација.

Во сите пет испитни постапки, тестирањето е спроведено во трифазни симетрични услови, со напони и струи чишто ефективни вредности се еднакви на номиналните параметри на броилото. Во секоја мерна точка направени се по пет мерења, а резултатите се прикажани во форма на усреднети релативни грешки на покажувањето на броилото во однос на референтната реактивна енергија, генерирана со секундарниот еталон на Лабораторијата, CALMET C300 [68], израз (3.17). Имајќи предвид дека одзивот на броилото се споредува со референтна моќност/енергија, пресметана според различна дефиниција, од секое мерење се добиваат по три резултати во форма на усреднети релативни грешки. Доколку резултатите од мерењето, покрај во фукција од променливиот хармониски параметар, се групираат и во однос на пристапот според кој се пресметува референтната големина, за секоја мерна под – процедура се добиваат по три криви на грешка. Овие криви на грешка во најголема мера ги претставуваат отстапувањата на мерниот уред во однос на различниот начин на толкување на поимот реактивна моќност и/или енергија во несинусни услови, па затоа истите ќе бидат наречени криви на грешка заради неусогласен алгоритам на мерење.

6.2. Испитуван уред и калибрација во синусни услови

За потребите на конкретната испитна постапка, употребено е истото дигитално броило, врз кое се спроведени првичните тестирања и деталната испитна постапка, опфатени во четвртото, односно петтото, поглавје од докторската дисертација, Landis+Gyr ZMD405CT44.2407, 3.58 V/100 V, 5 A, 50 Hz [85]. Класата на точност на конкретниот уред, во доменот на мерење реактивна енергија, е 1. Согласно упатството од производителот [85], реактивната енергија може да се регистрира на два начина. Првиот начин се сведува на фазно поместување на трифазните напони за 90°, пред примероците од истите да се помножат со семплираните вредности на мерените струи, и да се изврши усреднување на моменталната моќност во даден временски интервал. Упатството [85] укажува дека во конкретниот уред е имплементиран некој од алгоритмите за мерење претставени со равенките (3.11) или (3.12), односно дека реактивната моќност се мери преку претходно аналогно или дигитално (фазно или временско) поместување на мерените напони. Вториот начин на мерење, имплементиран во конкретниот уред, е базиран на векторскиот принцип, т.е. на алгоритамот за мерење прикажан преку изразот (3.13), каде што реактивната моќност се добива пресметковно, преку измерените активна и привидна моќност, и триаголникот на моќности. Овој начин на мерење кај уредот е исклучен, имајќи предвид дека истиот е комплетно неусогласен со приликите во несинусни сигнални услови, особено доколку референтната моќност/енергија се пресметува согласно принципот на фундаментални компоненти или дефиницијата на Budeanu [13].

Пред да се започне со реализација на испитниот протокол, кој опфаќа хармониски изобличени напони и струи, броилото треба да се калибрира со синусни тест сигнали, имајќи предвид дека интринсичните грешки, во доменот на мерење реактивна енергија, не се претходно утврдени. Испитувањето со синусни тест сигнали ги опфаќа истите мерни точки кои се предвидени во претходно усвоените процедури и под – процедури, од аспект на ефективните вредности на применетите напони и струи и фазните агли помеѓу нив. Резултатите од постапката за утврдување интринсични грешки на броилото, се илустрирани на Слика 6.1.

Од резултатите прикажани на Слика 6.1 може да се заклучи дека броилото е во одлична состојба, имајќи предвид дека измерените отстапувања се неколкукратно помали од ограничувањата, согласно декларираната класа на точност. Во оние мерни точки кои соодветствуваат на висок удел на реактивна моќност/енергија во системот, грешките се речиси константни. Кога броилото подлежи на индуктивно оптоварување, регистрирани се грешки приближно еднакви на 0,2 %, во интервалот на φ помеѓу 60° и 90°, додека истите се приближно еднакви на 0,17 %, за истиот опсег на φ кој одговара на капацитивно оптоварување. За помали фазни агли, т.е. за помал удел на реактивна моќност во системот, грешките при индуктивен товар се зголемуваат до максимални 0,36 %, при $\varphi=15^\circ$, додека во доменот на капацитивно оптоварување, истите опаѓаат до вредност од 0,02 %, кога $\varphi=-15^\circ$.



Слика 6.1 Интринсични грешки на испитуваното броило, $\delta_{Qsin}=f(\varphi), U=58$ V и I=5 A

6.3. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната фундаментална реактивна моќност, *Q*₁

Првиот сет мерни податоци ги опфаќа резултатите од петте испитни процедури, пришто референтната реактивна моќност се зема за еднаква на компонентата од вкупно расположливата моќност, која произлегува од проекциите на фундаменталните напони и струи, меѓусебно фазно поместени за 90°. Со други зборови, одзивот на броилото се споредува со генерираната фундаментална реактивна моќност, $Q_{1,3f}$, чијашто вредност може да се пресмета согласно равенката (2.29), имајќи предвид дека мерењата се спроведени во симетрични трифазни услови. Разликите помеѓу измерената и генерираната реактивна моќност, во продолжение, ќе бидат означени со δ_{Q1} , укажувајќи на методот на пресметка на референтната големина.

Резултатите од првите две испитни процедури, кои се однесуваат на варијабилни почетни фазни поместувања помеѓу вишите хармоници од 5^{тн} ред и компонентите на сигналите со фреквенција од 50 Hz, се илустрирани на Слика 6.2 и Слика 6.3. Од кривите на грешка, кои соодветствуваат на различни вредности за θ_{i5} и θ_{u5} , можат да се извлечат првични заклучоци за имплементираниот мерен алгоритам во броилото. Имајќи предвид дека регистрираните отстапувања во двете мерни процедури се релативно мали и дека поединечните криви на грешка имаат променлива амплитуда и периода од 360°/5=72°, може да се заклучи дека броилото ја мери реактивната моќност согласно методот на аналогно (фазно) поместување на мерените напони за 90°, равенка (3.11). Доколку се усвои конкретниот алгоритам за мерење, и доколку се занемарат интринсичните грешки на мерилото, во општ случај, при случаен број хармоници присутни во испитните сигнали, релативната грешка изнесува:

$$\delta_{Q1} = \frac{Q_{UUT} - Q_{1,3f}}{Q_{1,3f}} \cdot 100 \approx \frac{\sum_{h=1}^{n} \frac{3U_h I_h \sin \varphi'_h}{h} - 3U_1 I_1 \sin \varphi_1}{3U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{\sum_{h>1}^{n} \frac{3U_h I_h \sin \varphi'_h}{h}}{3U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \sum_{h>1}^{n} \frac{1}{h} \cdot \frac{u_{h,\%}}{100} \cdot \frac{i_{h,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi'_h}{\sin \varphi_1} \cdot 100 ,$$
(6.1)

каде што фазниот агол помеѓу вишите хармоници на напонот и струјата од ред h, φ'_h , се пресметува согласно изразот (5.15), имајќи ги предвид заклучоците од петтото поглавје на докторскиот труд. Доколку равенката (6.1) се прилагоди за нагодувањето на конкретните испитни процедури, во кои фигурираат само виши хармоници од 5^{ти} ред, чиишто релативни удели изнесуваат $u_{5,\%}=10$ % и $i_{5,\%}=40$ %, релативната грешка во мерењето, во поединечни мерни точки, изнесува:

$$\delta_{Q1} \approx \frac{\frac{3U_5 I_5 \sin \varphi_5'}{5}}{3U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{1}{5} \cdot \frac{u_{5,\%}}{100} \cdot \frac{i_{5,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = = \frac{1}{5} \cdot 0.1 \cdot 0.4 \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = 0.8 \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1}.$$
(6.2)

Од изразот (6.2) може да се заклучи дека отстапувањето на броилото во однос на $Q_{1,3f}$ зависи обратно пропорционално од $\sin\varphi_1$. Гледано од перспектива на мерната процедура $\sin\varphi_1$ е минимален во мерните точки кои соодветствуваат на фундаментален фазен агол од $\pm 15^{\circ}$ и истиот изнесува $\pm 0,259$. Тоа значи дека, грешката ќе биде максимална кога $\sin\varphi'_5 = 1$ и истата, согласно (6.2), нема да надмине $\pm 3,1$ %, за конкретното нагодување на испитниот протокол, што е воочливо и од самите резултати прикажани на Слика 6.2 и Слика 6.3.



Слика 6.2 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$



Слика 6.3 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$

Од аналитичкиот израз (6.2) може да се заклучи дека поединечните криви на грешка ќе имаат различни пресечни точки со х-оската, во зависност од фазната разлика θ_{i5} - θ_{u5} на која истите одговараат. Од сликите 6.2 и 6.3, може да се утврди дека пресечните точки на кривите се поместени во позитивна насока во однос на х-оската, за вредноста на интринсичната грешка, δ_{Qsin} , на самото броило [85]. Во однос на интензитетот на отстапувањата, може да се извлече генерален заклучок дека, независно од вредностите на θ_{i5} и θ_{u5} , разликата помеѓу измерената реактивна моќност и генерираната фундаментална моќност е мала и истата е во рамки на декларираната класа на точност на броилото во случај на висок удел на реактивна моќност во системот, т.е. кога φ_1 е помеѓу ±45° и ±90°. За помали фазни агли помеѓу фундаменталните напони и струи, вкупното отстапување расте, а уделот на интринсичната грешка во поединечните криви е се помалку забележливо.

Отстапувањата на броилото, во функција од промената на релативниот удел на вишите хармоници од 5^{ти} ред во струјните, односно напонските, сигнали, се прикажани на Слика 6.4, односно Слика 6.5. И на двете слики, се забележува синусниот облик на поединечните криви на грешка, со периода од $360^{\circ}/5=72^{\circ}$, при што истите се во фаза, имајќи ја предвид константната фазна разлика θ_{i5} - θ_{u5} =60°. Пресечните точки на поединечните криви се поместени во однос на апцисната оска за приближно 0,2 %, имајќи ја предвид интринсичната грешка на броилото. Амплитудите на кривите $\delta_{Q1} = f(\varphi_1)$ линеарно зависат од уделот на струјниот и напонскиот хармоник, што може да се воочи и од аналитичките изрази (6.1) и (6.2). Варијациите во отстапувањата за различни вредности на i_{5,%} и u_{5,%} се поголеми во оние мерни точки кои соодветствуваат на помал удел на реактивна моќност во системот. За конкретното нагодување на испитните сигнали, максималната разлика помеѓу измерената и генерираната моќност се забележува при $\varphi_1 = -15^\circ$. Екстремната вредност за грешката варира помеѓу 1,32 % и 1,88 %, во процедурата која соодветствува на променлив удел на 5^{тиот} струен хармоник, во интервалот помеѓу $i_{5,\%}=20$ % и $i_{5,\%}=40$ %. Од друга страна, кога уделот на 5^{тиот} хармоник во трифазните напони се менува помеѓу 2,5 % и 10 %, максималното отстапување варира помеѓу 0,85 % и 1,88 %, за истата вредност на фундаменталниот фазен агол од -15°.



Слика 6.4 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, $u_{5,\%}=10$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$



Слика 6.5 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{O1}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на $u_{5,\%}$, $i_{5,\%}=40\%$, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$

И кај двата сета мерни резултати, прикажани на Слика 6.4 и Слика 6.5, се забележуваат отстапувања во обликот на поединечните криви на грешка, а тоа е особено забележливо при помали хармониски изобличувања на сигналите. Имено, кога $i_{5,\%}<30$ % или $u_{5,\%}<5$ %, уделот на компонентата ($3U_5I_5\sin\varphi'_5$)/5 во отчитувањето на броилото е мала и истата е споредлива со интензитетот на неговата интринсична грешка. Конкретниот феномен резултира со пораст на вкупното отстапување во некои мерни точки, додека во други, обратната насока на поединечните компоненти на грешка, придонесува за делумно или комплетно поништување на разликата помеѓу измерената вредност и генерираната фундаментална реактивна моќност.

Резултатите од последната испитна процедура, која одговара на променлив ред на вишите хармоници, присутни во трифазните напони и струи, се прикажани на Слика 6.6.

Од конкретните мерни резултати може да се верификува заклучокот за имплементираниот мерен алгоритам во броилото, имајќи предвид дека периодата на поединечните криви на грешка е инверзно пропорционална на редот на вишите хармоници, присутни во сигналите. Амплитудите на поединечните зависности $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, исто така, се менуваат во зависност од редот на присутните виши хармоници. Имајќи го предвид општиот израз за пресметка на грешките во мерењето, равенка (6.1), отстапувањата во поедини мерни точки од конкретната под – процедура, можат да се моделираат со равенката:

$$\delta_{Q1} \approx \frac{\frac{3U_h I_h \sin \varphi'_h}{h}}{3U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{1}{h} \cdot \frac{u_{h,\%}}{100} \cdot \frac{i_{h,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi'_h}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{1}{h} \cdot 0, 1 \cdot 0, 4 \cdot \frac{\sin \varphi'_h}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{4}{h} \cdot \frac{\sin \varphi'_h}{\sin \varphi_1},$$
(6.3)

од кој може да се извлече заклучок дека, за константно вкупно хармониско изобличување на трифазните напони и струи, интензитетот на отстапувањата зависи пропорционално од соодносот $\sin\varphi'_h/\sin\varphi_1$, а обратно пропорционално од редот на вишите хармоници, *h*. Последниот заклучок имплицира дека максималните отстапувања може да се регистрираат во различни мерни точки, а не само за оние вредности на φ_1 во кои фундаменталната реактивна моќност е минимална. Дополнително, со зголемување на редот на хармониците, присутни во испитните напони и струи, измерената реактивна моќност се доближува до вредноста на применетата фундаментална моќност. Последното тврдење не ги зема во предвид евентуалните дополнителни грешки кои се резултат на можностите за генерирање компоненти со повисока фреквенција [68] или можностите за нивно мерење со соодветната инструментација [85].



Слика 6.6 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{1,3f}$, $\delta_{Q1}=f(\varphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $\theta_{uh}=0^\circ$, $\theta_{ih}=60^\circ$

6.4. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната реактивна моќност пресметана согласно дефиницијата на *Budeanu*, *Q*_B

Вториот сет мерни податоци ги прикажува резултатите од мерните процедури, применети врз испитуваното броило [85], при што референтната реактивна моќност се пресметува согласно дефиницијата на *Budeanu* [13], равенка (2.22). Разликите помеѓу измерената и применетата моќност, ќе бидат означени како δ_{QB} . Имајќи го предвид мерниот алгоритам, имплементиран во броилото, равенка (3.11), и заклучоците од претходното поглавје, според кои фазорите на вишите хармоници, од страна на еден мерен уред, се детектираат со спротивна насока на ротација во однос на фазорите на компонентите со фреквенција од 50 Hz, релативната грешка, во општ случај, може да се прикаже како:

$$\delta_{QB} = \frac{Q_{UUT} - Q_{B,3f}}{Q_{B,3f}} \cdot 100 \approx \frac{3\sum_{h=1}^{n} \frac{U_h I_h \sin \varphi'_h}{h} - 3\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \sin \varphi_h}{3\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \sin \varphi_h} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\sum_{h>1}^{n} \frac{U_h I_h}{h} (\sin \varphi'_h - h \sin \varphi_h)}{\sum_{h=1}^{n} U_h I_h \sin \varphi_h} \cdot 100 ,$$
(6.4)

каде што φ_h е фазниот агол помеѓу напонските и струјните виши хармоници од ред *h*, пресметан според изразот (2.15), онака како што истиот е прикажан при нагодувањето на референтниот еталон, CALMET C300 [68], а φ'_h е истиот фазен агол, пресметан согласно равенката (5.15), онака како што е регистриран со испитуваното броило. Во изразот (6.4) занемарени се интринсичните грешки на броилото. Имајќи предвид дека низ петте процедури, во испитните сигнали, фигурираат виши хармоници од само еден ред, општиот израз за пресметка на отстапувањата го добива следниот облик:

$$\delta_{QB} \approx \frac{\frac{U_h I_h}{h} (\sin \varphi'_h - h \sin \varphi_h)}{U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_h I_h \sin \varphi_h} \cdot 100.$$
(6.5)

За симулација на обликот на поединечните криви на грешка, може да се усвојат дополнителни апроксимации во равенката (6.5). Имено, уделот на вишите хармоници на напоните, односно струите, е ограничен на 10 %, односно 40 %, од вредноста на фундаменталните компоненти, што значи дека реактивната моќност на вишите хармоници ќе биде значително помала во однос на фундаменталната реактивна моќност:

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 \gg U_h I_h \sin \varphi_h , \qquad (6.6)$$

па релативната грешка, со примена на конкретниот заклучок, може да се прикаже како:

$$\delta_{QB} \approx \frac{\frac{U_h I_h}{h} (\sin \varphi'_h - h \sin \varphi_h)}{U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{1}{h} \cdot \frac{u_{h,\%}}{100} \cdot \frac{i_{h,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi'_h - h \sin \varphi_h}{\sin \varphi_1} \cdot 100 \,. \tag{6.7}$$

Од последниот израз може да се заклучи дека грешката, поради неусогласеноста на мерниот алгоритам на броилото и начинот на пресметка на референтната моќност, ќе се

менува според синусна функција во однос на φ_1 , со променлива амплитуда, и периода обратно пропорционална на периодата на сигналите со фундаментална фреквенција, за степен еднаков со редот на вишите хармоници.

Верификацијата на заклучокот за обликот на кривите на грешка, кои се однесуваат на различни вредности за почетните фазни агли на вишите хармоници од 5^{ти} ред во однос на фундаменталните компоненти на струите и напоните, θ_{i5} и θ_{u5} , е претставена преку Слика 6.7, односно Слика 6.8. Од наведените зависности $\delta_{OB} = f(\varphi_1)$, може да се заклучи дека отстапувањата на броилото во однос на референтната реактивна моќност, пресметана според дефиницијата на Budeanu [13], се значително поголеми во однос на разликите помеѓу покажувањето на броилото и фундаменталната реактивна моќност, за идентичното нагодување на мерните сигнали. Во рамки на конкретното испитување, регистрирани се максимални грешки, кои се 4 до 5 пати поголеми во однос на најголемите отстапувања, прикажани во делот на првиот сет мерни податоци. Така, во мерните точки кои одговараат на позначаен удел на реактивна моќност во системот, т.е. кога φ_1 се менува помеѓу $\pm 45^{\circ}$ и $\pm 90^{\circ}$, во секоја под – процедура, забележани се максимални разлики помеѓу Q_{UUT} и Q_{C300} од ±6,5 %. Ориентацијата на максималното отстапување и вредноста на фундаменталниот фазен агол за која се регистрира конкретната екстремна вредност, зависат од почетните фазни поместувања на вишите хармоници. За помал удел на реактивна моќност во системот, регистрирани се грешки од ред на големина ±15 %, кои најчесто се среќаваат во мерните точки кои одговараат на $\varphi_1 = \pm 15^\circ$. Две криви на грешка, кои соодветствуваат на фазни разлики θ_{i5} - θ_{u5} , меѓусебно поместени за 180°, имаат пресеци на самата апцисна оска, што претставува уште една потврда дека во вкупната грешка доминира компонентата која произлегува од неусогласеноста помеѓу имплементираниот алгоритам за мерење и усвоената дефиниција за пресметка на референтната големина. Со други зборови, во конкретните сетови мерни резултати, постоењето интринсична грешка кај броилото може да се занемари.



Слика 6.7 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^\circ$



Слика 6.8 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{OB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$

На Слика 6.9 и Слика 6.10, претставени се разликите помеѓу измерената реактивна моќност и референтата големина, пресметана согласно принципот предложен од Budeanu [13], за различен релативен удел на вишите хармоници од 5^{ти} ред во струјните, односно напонските, сигнали. Кривите на грешка, кои произлегуваат од добиените резултати во рамките на спроведените под – процедури, имаат идентичен бранов облик, со променлива амплитуда, која согласно равенките (6.4)-(6.7), речиси линеарно зависи од вредноста на $u_{5,\%}$ и $i_{5,\%}$. Поединечните зависности $\delta_{QB} = f(\varphi_1)$, илустрирани на сликите 6.9 и 6.10 имаат периода од 360°/5=72° и се меѓусебно во фаза, имајќи ја предвид константната фазна разлика θ_{i5} - θ_{u5} =60°, во сите испитни под – процедури. Она што може да се забележи од двата сета податоци е дека промената на грешките во поединечни мерни точки е позначителна за помали вредности на фундаменталниот фазен агол φ_1 . Екстремна вредност за отстапувањата е регистрирана при $\varphi_1 = 15^\circ$. За интервал на промена на уделот на 5^{тиот} струен хармоник во сигналите, *i*_{5,%}, помеѓу 20 % и 40 %, максималната грешка варира помеѓу -4,81 % и -9,5 %. Во процедурата која се однесува на променлив интензитет на 5^{тиот} хармоник во трифазните напони, грешките во мерната точка која одговара на $\varphi_1 = 15^\circ$ варираат помеѓу -2,48 % и -9,5 %, при промена на *и*_{5,%} во интервалот од 2,5 % до 10 %.

Максималните отстапувања, измерени во некоја мерна точка, за различни вредности на уделот или почетните фазни поместувања на вишите хармоници, можат да се третираат како екстремни вредности за грешката кај броила кои функционираат според наведениот мерен принцип, во однос на дефиницијата предложена од страна на *Budeanu* [13], и во општ случај, кога во сигналите фигурираат повеќе виши хармоници, со случаен удел и фазно поместување. За да можат снимените максимални отстапувања да се усвојат како екстремни вредности за грешката во општ случај, потребно е единствено вкупното хармониско изобличување да не ги надмине уделите на напонските и струјните хармоници наведени во предложените процедури. Оваа претпоставка се базира на фактот дека, во случај на присуство на повеќе виши хармоници во сигналите, веројатно е да се јават компоненти на моќност со спротивен тек, кои ќе имаат тенденција за меѓусебно поништување.



Слика 6.9 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, $u_{5,\%}=10$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$, $\theta_{i5}=60^{\circ}$



Слика 6.10 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{OB}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на $u_{5,\%}$, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u}_{5}=0^{\circ}$, $\theta_{i}_{5}=60^{\circ}$

Резултатите од последната испитна процедура, илустрирани на Слика 6.11, го верификуваат почетниот математички модел за обликот на кривите на грешка, односно потврдуваат дека нивната периода е обратно пропорционална на редот на хармониците присутни во сигналите. Имено, периодата на отстапувањата изнесува 360/7=51,43°, кога, покрај фундаменталните напони и струи, во спектарот на испитните сигнали фигурираат виши хармоници од 7^{ми} ред. Истата се намалува на 360°/9=40°, кога напоните и струите поседуваат виши хармоници од 9^{ти} ред. Во последната под – процедура, во која се применети компоненти, чијашто фреквенција изнесува 550 Hz, периодата на соодветната крива на грешки изнесува 360/11=32,73°.



Слика 6.11 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}$, $\delta_{QB}=f(\varphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници h, u_h , w=10 %, i_h , w=40 %, $\theta_{uh}=0^\circ$, $\theta_{ih}=60^\circ$

Кривите прикажани на Слика 6.11 можат да послужат како дополнителна потврда за максималниот интензитет на отстапувања, дискутиран претходно. Може да се забележи дека, кога φ_1 е помеѓу ±45° и ±90°, максималната грешка на броилото не надминува ±6,5 %, додека мерната точка која одговара на истата е поместена во зависност од редот на вишите хармоници. Екстремните вредности за отстапувањето не ги надминуваат претходно утврдените граници, ниту при помал удел на реактивна моќност во системот. Така, максималната разлика помеѓу измерената и референтната моќност изнесува -10,62 %, кога во трифазните напони и струи се присутни хармоници од 7^{ми} ред, и истата е регистрирана за φ_1 =-20°. Доколку испитувањето се прави со изобличени сигнали, во кои фигурираат виши хармоници од 9^{ти} ред, максималната грешка на броилото [85], изнесува 11,76 %, при φ_1 =20°. Во истата мерна точка е регистриран и пикот на кривата на грешки при испитни сигнали со виши хармоници чијашто фреквенција е еднаква на 550 Hz, а $\delta_{QB,max}$ во конкретната под – процедура изнесува 13,12 %.

6.5. Одзив на броилото при хармониски услови во однос на референтната реактивна моќност пресметана согласно дефиницијата на *Fryze*, *Q*_F

Третиот сет мерни податоци, ги прикажува интензитетот и диспозицијата на отстапувањата на отчитувањата со броилото, во однос на референтната реактивна моќност, пресметана согласно пристапот на *Fryze* [14]. Имајќи ја предвид дефиницијата за пресметка на генерираната моќност/енергија со лабораторискиот секундарен еталон [68], во понатамошниот текст ќе биде усвоено именувањето $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, а грешките во поединечни мерни точки ќе бидат означени како δ_{QF} .

При претставување на испитниот протокол, беше назначено дека мерењата ќе бидат спроведени во трифазни симетрични услови. Привидната моќност во трифазен симетричен систем, S_{3f}^{E} , се пресметува според т.н. ефективен пристап, равенка (2.42). Трифазната активна моќност, P_{3f} , која произлегува од проекциите на поединечните фундаментални и

виши хармоници кои се меѓусебно во фаза, се пресметува согласно равенката (2.19). Трифазната реактивна моќност, изразена согласно пристапот на *Fryze* [14], претставува производ помеѓу зададениот напон и проекцијата на струјниот сигнал, фазно поместен во однос на тој напон за 90°, и истата може да се пресмета од триаголникот на моќности, валиден за синусен режим:

$$Q_{F,3f} = \sqrt{\left(S_{3f}^{E}\right)^{2} - \left(P_{3f}\right)^{2}}.$$
(6.8)

Доколку се спореди изразот (6.8) со равенката (3.11), која го прикажува мерниот алгоритам на броилото, може да се заклучи дека неговото покажување ќе биде помало од зададената моќност, за било кое нагодување на фундаменталните и хармониските параметри, опфатено во испитниот протокол. Со други зборови, релативните грешки, δ_{QF} , се очекува да бидат негативни во секоја мерна точка од испитните процедури. Поради фактот што во $Q_{F,3f}$ фигурираат и компоненти на т.н. моќност на дисторзија, која е математички евалуирана со равенката (2.31), се очекува, во рамки на конкретното тестирање, да се јават отстапувања, кои се поголеми во однос на грешките, претставени во претходните два сета мерни податоци. Според тоа, интринсичната грешка на броилото може да се занемари, односно ќе биде усвоено дека целокупното регистрирано отстапување произлегува од неусогласеноста помеѓу мерниот алгоритам на броилото и начинот на пресметка на референтната големина.

На Слика 6.12 и Слика 6.13, прикажани се резултатите од испитувањето на броилото [85] во рамки на процедурите кои одговараат на променливи почетни фазни поместувања на вишите хармоници од 5^{ти} ред, θ_{i5} и θ_{u5} . Од сликите може да се потврди почетната претпоставка за негативната ориентација на грешките, при промена на фазните агли и кај фундаменталните и кај хармониските компоненти на сигналите. Резултатите од првите две процедури ја потврдуваат и претпоставката за интензитетот на отстапувањата, во споредба со измерените грешки, добиени кога референтната моќност е еднаква на фундаменталната реактивна моќност или на моќноста пресметана согласно пристапот на *Budeanu* [13].



Слика 6.12 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, $\delta_{QF}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$



Слика 6.13 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, $\delta_{QF}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$

Од поединечните криви на грешка, прикажани на сликите 6.12 и 6.13, може да се заклучи дека отстапувањето на броилото [85] во однос на моќноста пресметана според пристапот на *Fryze* [14], е малку зависно од вредноста на θ_{i5} и θ_{u5} , кога φ_1 се менува помеѓу ±60° и ±90°. Грешките во овој интервал се релативно константни и нивниот интензитет е споредлив со максималните разлики помеѓу измерената моќност и референтата моќност, пресметана според дефиницијата на *Budeanu* [13], за истиот опсег на вредности за φ_1 . Разликата помеѓу покажувањето на броилото [85] и трифазната референтна моќност, пресметана согласно пристапот на *Fryze* [14], се менува во интервалот помеѓу -7 % и -8 %, кога φ_1 =±90°, а истата расте до вредност помеѓу -9 % и -11 %, кога фундаменталниот фазен агол, φ_1 , изнесува ±60°, било да станува збор за капацитивен или индуктивен карактер на оптоварувањето.

Во случај на помал удел на реактивна моќност во системот, се забележува интензивен пораст на грешките, а истите се максимални кога $\varphi_1=\pm 15^\circ$. Наглото зголемување на δ_{QF} , при намалување на φ_1 , се должи на релативното намалување на моќноста која инструментот ја регистрира, равенка (3.11), во однос на вкупната реактивна моќност, $Q_{F,3f}$. Согласно равенката (6.8), во референтната реактивна моќност, фигурираат и компоненти на вкупната привидна моќност, кои не се менуваат со промена на φ_1 , а кои броилото не ги детектира како измерена реактивна моќност. Тоа се т.н. моќности на струјна и напонска дисторзија, D_{Ih} и D_{Uh} , равенка (2.39), чиишто интензитет зависи исклучиво од степенот на хармониско изобличување на сигналите. Покрај овие две компоненти на нефундаменталната привидна моќност, S_h , равенки (2.38) и (2.39), константна вредност, при фиксно хармониско изобличување, поседува и т.н хармониска моќност на дисторзија, $D_{\Sigma h}$, равенка (2.40), која е резултат на интерференцијата помеѓу вишите напонски и струјни хармоници од различен ред. Оваа моќност не придонесува во вкупната грешка при тековното испитување, имајќи предвид дека во тест сигналите фигурираат виши хармоници од само еден ред.

Мерната точка во која разликата помеѓу Q_{UUT} и $Q_{F,3f}$ е максимална зависи од интензитетот на θ_{i5} и θ_{u5} , односно од вредноста на нивната разлика. Во оние мерни под – процедури, во кои разликата помеѓу почетните фазни агли на вишите хармоници од 5^{ти} ред, θ_{i5} - θ_{u5} е еднаква на 0° или на 180°, кривите на грешка се симетрично поставени во однос на

ординатната оска. Со други зборови, отстапувањето регистрирано во мерните точки кои соодветствуваат на фундаментални фазни агли од -15° и 15° е речиси идентично, а евентуалните минимални варијации се должат на интензитетот на интринсичната грешка или на варијациите во генерираните сигнали [68]. Конкретната симетрија може да се потврди од кривите кои одговараат на вредности од 0° или 180° за θ_{i5} , од првата под – процедура, имајќи предвид дека $\theta_{u5}=0^\circ$, или од кривата која одговара на вредност од 60° за θ_{u5} , имајќи предвид дека $\theta_{i5}=60^\circ$, од втората под – процедура. Максималната грешка во овие мерни точки изнесува -43 %, кога θ_{i5} - θ_{u5} =0°, односно -50 %, кога θ_{i5} - θ_{u5} =180°. Кога разликата помеѓу почетните фазни поместувања на вишите хармоници од 5^{ти} ред, θ_{i5} - θ_{u5} , е помеѓу 0° и 180°, максималната грешка се поместува во опсегот на индуктивни оптоварувања, па за конкретните мерења е регистрирана кога $\varphi_1 = 15^\circ$. Последното тврдење произлегува од кривите на грешка кои одговараат на вредности за θ_{i5} од: 60°, 90° и 120°; од првата мерна процедура, имајќи предвид дека $\theta_{u5}=0^{\circ}$. За кривите на грешка прикажани на Слика 6.13, максималното отстапување е во подрачјето на индуктивно оптоварување, кога θ_{u5} изнесува: 270°, 300° и 0°; имајќи предвид дека θ_{i5} поседува константна вредност од 60° во текот на целокупната процедура. Од друга страна, за сите преостанати под – процедури, во кои θ_{i5} - θ_{u5} е помеѓу 180° и 360°, максималното отстапување е регистрирано во опсегот на капацитивно оптоварување, т.е. во мерната точка која одговара на фундаментален фазен агол од -15°. Независно дали максималната разлика помеѓу измерената и зададената моќност е во опсегот на капацитивно или индуктивно оптоварување, истата изнесува помеѓу -48 % и -54,5 %, за спроведеното сетирање на испитните сигнали.

Резултатите од испитните процедури со променлив удел на вишите хармоници од 5^{ти} ред во струјните, односно напонските, сигнали, се прикажани на Слика 6.14 и Слика 6.15. Двата сета мерни податоци ги потврдуваат претходните заклучоци за обликот на кривите на грешка, од аспект на релативно константни отстапувања, при голем удел на реактивна моќност во системот, и стрмен пораст на грешките, при фундаментални фазни агли помали од $\pm 60^{\circ}$. За различни вредности на $i_{5,\%}$ и $u_{5,\%}$, се потврдува и точката на максимално отстапување, која одговара на $\varphi_1=15^{\circ}$, имајќи предвид дека разликата θ_{i5} - θ_{u5} е константна и истата изнесува 60°.



Слика 6.14 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, $\delta_{F}=f(\varphi_1)$, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$



Слика 6.15 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, $\delta_F=f(\varphi_1)$, за различни вредности на $u_{5,\%}$, $i_{5,\%}=40\%$, $\theta_{u5}=0^\circ$, $\theta_{i5}=60^\circ$

Сликите 6.14 и 6.15 покажуваат дека интензитетот на отстапувањата се менува речиси линеарно со пораст на релативниот удел на вишите хармоници во испитните напони и струи. Бидејќи вкупното хармониско изобличување на струјните сигнали, *THD_I*, е значително поголемо од изобличувањето *THD_U*, на трифазните напони, процентуалната промена на максималната грешка во процедурата со променлив $i_{5,\%}$ е приближно еднаква со промената на уделот на вишиот хармоник од 5^{ти} ред во трифазните струи. Во согласност со конкретното тврдење, од резултатите прикажани на Слика 6.14, може да се утврди дека $\delta_{F,max}$ се менува помеѓу -31,65 % и -51,98 %, кога $i_{5,\%}$ е помеѓу 20 % и 40 %. Промената на максималните грешки, во процедурата со променлива амплитуда на напонскиот хармоник од 5^{ти} ред, е помалку значителна, па така, од Слика 6.15, може да се утврди дека $\delta_{F,max}$ се менува помеѓу -47,22 % и -51,98 %, кога $u_{5,\%}$ се движи помеѓу 2,5 % и 10 %.

На Слика 6.16, прикажани се резултатите од мерната процедура која опфаќа константно струјно и напонско изобличување, со константно почетно фазно поместување помеѓу вишите хармоници и фундаменталните компоненти, при променлив ред на хармониците присутни во сигналите. Од презентираните криви на грешка, може да се забележи дека, подрачјето на речиси константно отстапување се намалува со пораст на редот на вишите хармоници. Ако се споредат четирите криви, прикажани на Слика 6.16, може да се заклучи дека регистрираните грешки имаат релативно константна вредност, помеѓу -7,5 % и -9 %, за опсег на оптоварувања кој кореспондира на фундаментален фазен агол помеѓу ±70° и $\pm 90^{\circ}$. При помали вредности за φ_1 , приближно помеѓу $\pm 35^{\circ}$ и $\pm 70^{\circ}$, кај кривите кои ја прикажуваат разликата помеѓу измерената и зададената реактивна моќност, се забележува променлив сегмент, а самите отстапувања осцилираат помеѓу -10 % и -20 %. Должината на овој интервал во голема мера зависи од редот на вишите хармоници во сигналите, па истиот е речиси незначителен кога h=5, а е најголем кога напоните и струите поседуваат виши хармоници од 11^{ти} ред. За оптоварувања кои резултираат со мал удел на реактивна моќност во системот, грешките нагло се зголемуваат со намалување на φ_1 . За конкретните нагодувања на испитните сигнали, $\delta_{F,max}$ се детектира во опсегот на индуктивно

оптоварување, имајќи предвид дека θ_{ih} - θ_{uh} =60°, во сите под – процедури, потврдувајќи ги претходните заклучоци, дури и при варијација на редот на вишите хармоници.

Заклучоците од досегашниот дел на шестата глава од докторската дисертација, кои се однесуваат на споредба помеѓу одзивот на испитуваното броило [85] и референтната реактивна моќност, пресметана од фундаменталните компоненти на напонот и струјата и согласно дефинициите на *Budenau* [13] и *Fryze* [14], се публикувани во рамки на трудовите со реден број [5] и [7], од листата на публикации.



Слика 6.16 Релативни грешки при мерењето реактивна моќност кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}$, $\delta_F=f(\varphi_1)$, за различен ред на вишите хармоници h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $\theta_{uh}=0^\circ$, $\theta_{ih}=60^\circ$

6.6. Мерење реактивна моќност при хармониски – изобличени сигнали, со лабораторискиот примарен еталон, ZERA COM3003

Од спроведените тест процедури врз броилото Landis+Gyr ZMD405CT44.2407 [85], можат да се извлечат неколку општи заклучоци. Најпрво, кај еден уред кој реактивната моќност/енергија ја регистрира преку аналогно (фазно) поместување на приложените напони (или струи), одзивот во голема мера се совпаѓа со фундаменталната реактивна моќност, споредбено со останатите пристапи за евалуација на мерената големина. Грешката која е резултат на несоодветноста на мерниот алгоритам е најмала кога покажувањето на инструментот се споредува со Q_1 , што значи дека овие уреди можат да одговорат на барањата на стандардот IEEE 1459 [51], и во хармониски услови. За применетите тест сигнали, измерените релативни грешки, δ_{Q1} , се во рамки на декларираната класа на точност на инструментот [85], при висок удел на реактивна моќност во системот. Од друга страна, броилото регистрира само дел од компонентите на вкупната хармониска моќност, евалуирана согласно дефиницијата на *Budeanu* [13], а истото е комплетно несоодветно за мерење на реактивната моќност, пресметана според пристапот на *Fryze* [14], каде измерените отстапувања достигнуваат вредност и до 50 %, за конкретниот сет испитни сигнали.

Последниот заклучок претставува појдовен чекор за прикажување на соодветноста за примена на еден уред, во кој е имплементиран алгоритам за мерење, различен од оној во испитуваното броило [85], за регистрирање реактивна моќност/енергија, според различни дефиниции. Доколку еден инструмент ги мери конкретните електрични големини преку временско (дигитално) поместување на приклучените напони (или струи), равенка (3.12), неговото покажување ќе се разликува за максимум 10 % до 12 % во однос на фундаменталната реактивна моќност, при хармониски изобличувања, идентични со оние применети во спроведената испитна процедура. Ако уредот ја мери реактивната моќност преку измерената активна и привидна моќност, равенка (3.13), тогаш неговото покажување ќе биде до 50 % поголемо од Q_1 , за истите тест сигнали.

За валидација на последните заклучоци, во продолжение, ќе бидат прикажани резултати од мерења спроведени со примарниот еталон на Лабораторијата, ZERA COM3003 [83]. Според техничкото упатство [83], овој уред поседува повеќе различни режими за мерење реактивна моќност. Од интерес за конкретната примена е т.н. "4WR" режим на мерење според кој, наведената големина се регистрира преку усреднување на производите од земените примероци на напонските сигнали и примероците на струјните сигнали, кои се поместени во однос на напонските за четвртина периода. Јасно е дека ваквиот пристап подразбира дигитално поместување на струјниот сигнал, односно за приказ на мерниот алгоритам на ZERA COM3003 [83] валидна е равенката (3.12).

Доколку покажувањето на овој инструмент се спореди со зададената фундаментална реактивна моќност, и притоа се занемарат интринсичните грешки, релативното отстапување, во општ случај, изнесува:

$$\delta_{Q1} = \frac{Q_{UUT} - Q_{1,3f}}{Q_{1,3f}} \cdot 100 \approx \frac{\sum_{h=1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}' - 3U_{1}I_{1}\sin\varphi_{1}}{3U_{1}I_{1}\sin\varphi_{1}} \cdot 100 = \frac{\sum_{h>1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}'}{3U_{1}I_{1}\sin\varphi_{1}} \cdot 100 = \sum_{h>1}^{n} \pm \frac{u_{h,\%}}{100} \cdot \frac{i_{h,\%}}{100} \cdot \frac{\sin\varphi_{h}'}{\sin\varphi_{1}} \cdot 100 ,$$
(6.9)

каде што во предвид е земена спротивната ориентација на фазорите на вишите хармоници, во однос на фазорите на фундаменталните компоненти, гледано од перспектива на мерниот инструмент. Од таа причина, аголот помеѓу вишите хармоници на напонот и струјата од ред *h* е означен како φ'_h , и истиот се пресметува согласно равенката (5.15). На Слика 6.17 и Слика 6.18, прикажани се резултати од мерења спроведени со ZERA COM3003 [83], при два сета изобличени сигнали. Првиот сет испитни напони и струи соодветствува со сигналите применети врз броилото Landis+Gyr ZMD405CT44.2407 [85], кои произлегуваат од стандардот EN 50470-3 [27]. Имено, во трифазните напони и струи, покрај компонентите со фреквенција од 50 Hz, фигурираат и виши хармоници од 5^{ти} ред, со следниве параметри: $u_{5,\%}=10\%$, $i_{5,\%}=40\%$, $\theta_{u5}=0^{\circ}$ и $\theta_{i5}=60^{\circ}$. Вториот сет испитни сигнали опфаќа повеќе непарни виши хармоници од различен ред, заклучно со 11^{тиот} хармоник, со случаен удел и почетно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти. Вкупното хармониско изобличување на напоните и струите е повторно ограничено на *THD*_U=10 %, односно *THD*_I=40 %. Заради обезбедување континуитет со претходно спроведените мерења, искористени се сигналите означени како "Прв сет тест сигнали", наведени во Табела 5.2, од делот на анализата која се однесува на мерење активна моќност и/или енергија.



Слика 6.17 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога Q_{C300}=Q_{1,3f}, δ_{Q1}=f(φ1), при тест сигнали со виши хармоници од 5^{mu} ред



Слика 6.18 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога Q_{C300}=Q_{1,3f}, δ_{01} =f(φ_1), при тест сигнали со случајно хармониско изобличување

Како што може да се забележи, на сликите 6.17 и 6.18, илустрирани се по две криви на грешка. Кривата на грешка означена како $\delta_{Q1,izm}$, ги прикажува разликите помеѓу трифазната реактивна моќност, измерена со примарниот еталон на ЛЕМ [83], и генерираната фундаментална моќност со секундарниот еталон [68]. Кривата означена како $\delta_{Q1,mod}$ ги прикажува очекуваните отстапувања, т.е. релативните грешки добиени пресметковно, согласно изразот (6.9). Од приказот на сликите 6.17 и 6.18 можат да се заклучат неколку работи. Најпрво, се потврдува дека мерниот алгоритам имплементиран во ZERA COM3003 [83] соодветствува на принципот на мерење прикажан со равенката (3.12). Овој заклучок произлегува од меѓусебното преклопување на кривите, кои се однесуваат на измерените и моделираните отстапувања, и при строго контролирано изобличување, Слика 6.17, и во

тестот кој опфаќа повеќе хармониски компоненти, со случаен релативен удел и случајно почетно фазно поместување, во трифазните напони и струи, Слика 6.18. Постоењето разлика помеѓу измерената и математички моделираната грешка во поедини мерни точки е резултат на реалната несиметрија на генерираните сигнали, пред се од аспект на можноста за воспоставување фиксно фазно поместување помеѓу фундаменталните и хармониските компоненти на сигналите во сите три фази, со секундарниот еталон CALMET C300 [68], и покрај тоа што неговото иницијално нагодување и соодветната пресметка се спроведени за трифазни симетрични услови. Од прикажаните резултати можат да се потврдат и претходните претпоставки за големината на грешките. На Слика 6.17, може да се забележи дека, грешките во процедурата со виши хармоници од 5^{ти} ред не надминуваат 6 %, кога φ_1 е помеѓу $\pm 45^{\circ}$ и $\pm 90^{\circ}$. При помал удел на реактивна моќност во системот, доаѓа до пораст на отстапувањата, па максималната релативна грешка е присутна во точка која соодветствува на φ_1 =-15°, и истата изнесува 9.56 %. Ваквата диспозиција на грешки е споредлива со случајот кога одзивот на броилото [85], чијшто мерен алгоритам е базиран на аналогно поместување на применетите напони, се споредува со референтната реактивна моќност пресметана согласно дефиницијата на Budeanu [13]. При случајни изобличувања на сигналите, Слика 6.18, регистрирани се помали отстапувања, со што се потврдува претходно споменатата претпоставка за евентуално меѓусебно поништување на грешките, кои се резултат на компонентите на моќност со спротивен тек.

Според равенката (3.12), измерената реактивна моќност/енергија со еден уред кој функционира на принцип на дигитално поместување на мерените напони или струи, кореспондира со моќноста пресметана согласно дефиницијата предложена од страна на *Budeanu* [13]. Ова е валиден заклучок, доколку вишите хармоници во трифазните напони и струи се во фаза, или противфаза, со фундаменталните напони и струи, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти на сигналите, во моментот на почеток на позитивната полупериода. Имајќи ја предвид равенката (5.15), усвоено е дека инструментите ги регистрираат фазорите на вишите хармоници со спротивна насока на ротација во однос на фазорите на фундаменталните компоненти. Согласно наведениот заклучок, очекувано е дека еден уред за мерење реактивна моќност и/или енергија, базиран на дигитално поместување на мерените напони или струи, ќе јави грешка во однос на референтната вредност, пресметана согласно дефиницијата на *Budeanu* [13]. Оваа грешка, доколку се занемарат интринсичните отстапувања, може аналитички да се претстави како:

$$\delta_{QB} = \frac{Q_{UUT} - Q_{B,3f}}{Q_{B,3f}} \cdot 100 \approx \frac{\sum_{h=1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h} - \sum_{h=1}^{n} 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}}{\sum_{h=1}^{n} 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\sum_{h>1}^{n} U_{h}I_{h}(\pm\sin\varphi_{h}' - \sin\varphi_{h})}{\sum_{h=1}^{n} U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}} \cdot 100 .$$
(6.10)

Доколку во спектарот на сигналите фигурираат само непарни виши хармоници, тогаш предзнакот на компонентата на мерената моќност зависи од редот на вишите хармоници на кои истата припаѓа. Вишите хармоници од ред: 5, 9, 13, 17, итн; инструментот ги регистрира со позитивен предзнак, онака како што истите течат во системот [55-56]. Компонентите на грешка, равенка (6.10), кои произлегуваат од присуството на овие виши хармоници, може да се пресметаат како:

$$\delta_{QBh} = \frac{-2U_h I_h \cos(h\varphi_1) \sin(\theta_{ih} - \theta_{uh})}{\sum_{h=1}^n U_h I_h \sin\varphi_h} \cdot 100.$$
(6.11)

Останатите непарни виши хармоници, односно компонентите од ред 3, 7, 11, 15, итн; инструментот ги регистрира со негативен предзнак, спротивно на нивното протекување во системот [55-56]. Аналитички, компонентите на грешката (6.10), кои соодветствуваат на мерењето на овие виши хармоници, можат да се претстават како:

$$\delta_{QBh} = \frac{-2U_h I_h \sin(h\varphi_1) \cos(\theta_{ih} - \theta_{uh})}{\sum_{h=1}^n U_h I_h \sin\varphi_h} \cdot 100.$$
(6.12)

Доколку во спектарот на сигналите се јават парни виши хармоници, компонентите на моќност, кои произлегуваат од истите, овие инструменти ги регистрираат како активна моќност [55-56]. Во рамки на испитувањата, спроведени за целите на докторската дисертација, не се применети сигнали во чиишто спектри фигурираат парни виши хармоници, имајќи предвид дека нивното присуство е индикатор за некаков дефект во системот [1-2]. Според тоа, компонентите на грешка, кои произлегуваат од можноста за нивно мерење, нема да бидат понатамошно разработени.

На Слика 6.19 и Слика 6.20 прикажани се грешките при мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003 [83], за двата, претходно наведени, сета испитни сигнали, во однос на референтната реактивна моќност, пресметана според пристапот на *Budeanu* [13], која се генерира со лабораторискиот секундарен еталон [68]. На двете слики, прикажани се по две криви на грешка кои се однесуваат на измерените отстапувања, $\delta_{QB,izm}$, односно на математички моделираните грешки, $\delta_{QB,mod}$, пресметани согласно равенките (6.10)-(6.12). Може да се заклучи дека разликата помеѓу измерената и зададената реактивна моќност ја следи анвелопата на моделираните грешки, а девијациите во поединечните точки се резултат на реалната несиметрија на генерираните трифазни сигнали.



Слика 6.19 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога Q_{C300}=Q_{B,3f}, δ_{QB}=f(φ ₁), при тест сигнали со виши хармоници од 5^{mu} ред



Слика 6.20 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога $Q_{C300}=Q_{B,3f}, \delta_{QB}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со случајно хармониско изобличување

Компонентите на реактивна моќност кои се резултат на вишите хармоници од 5^{тн} ред, еталонот [83] ги регистрира со позитивен предзнак [55-56], па според тоа грешките прикажани на Слика 6.19, се должат единствено на спротивната насока на ротација на фазорите на вишите хармоници во однос на насоката на ротација на фазорите на фундаменталните компоненти, гледано од перспективата на самиот мерен уред. Максималното отстапување, регистрирано при фундаментален фазен агол поголем од ±45°, изнесува 8,2 %. При помал удел на реактивна моќност во системот, во точката која соодветствува на φ_1 =30°, регистрирана е максимална грешка од 12,4 %, и оваа вредност е во согласност со очекуваниот екстремен интензитет за отстапувањата, наведен на почетокот од ова потпоглавје.

Грешките кои ги прави примарниот еталон на ЛЕМ [83], во однос на *Q*_B, при случајно изобличување на мерните сигнали, се илустрирани на Слика 6.20, и истите се резултат на два феномени. Дел од измерената грешка произлегува од спротивната насока на ротација на фазорите на вишите хармоници, во однос на насоката на ротација на фазорите на фундаменталните компоненти, гледано од перспектива на мерниот уред. Оваа компонента на вкупно измереното отстапување се јавува како резултат на целокупниот спектар на виши хармоници, присутни во испитните сигнали, и истата се манифестира преку начинот на пресметка на фазниот агол помеѓу напоните и струите од ред h, φ'_h . Постоењето виши хармоници од ред 3, 7 и 11, во испитните напони и струи, придонесува за дополнителна компонента на грешка, поради фактот што, еталонот [83] ги регистрира компонентите на реактивна моќност, кои произлегуваат од овие виши хармоници, со спротивен тек во однос на нивната референтна насока [55-56], равенки (6.10) – (6.12). Преку споредба на резултатите прикажани на Слика 6.19 и Слика 6.20, уште еднаш се потврдува можноста за осознавање на екстремните вредности за грешките, кои произлегуваат од несоодветноста на мерниот алгоритам, во изобличени услови, доколку се применат виши хармоници од само еден ред. Во случај на повеќе виши хармоници во сигналите, се јавуваат грешки кои се резултат на спротивните текови на моќност на поедини компоненти, и истите имаат тенденција за меѓусебно поништување.

Грешките во мерењата со примарниот еталон на Лабораторијата [83], во однос на зададената реактивна моќност, пресметана согласно дефиницијата на *Fryze* [14], се илустрирани на Слика 6.21 и Слика 6.22, за двата сета испитни сигнали. На сликите, не се прикажани математички моделирани криви на отстапување, бидејќи е повеќе од јасно дека постои потполна неусогласеност помеѓу мерниот алгоритам на еталонот [83] и начинот на пресметка на референтната реактивна моќност [14]. Измерените отстапувања повторно се должат на повеќе различни феномени. Во вкупно измерената грешка се јавува компонента која произлегува од насоката на ротација на фазорите на вишите хармоници, гледано од перспектива на мерниот уред, која се манифестира преку начинот на пресметка на φ'_h , равенка (5.15). Дел од грешката се должи и на спротивниот тек на компонентите на реактивна моќност, кои произлегуваат од вишите хармоници од ред: 3, 7, 11, 15 итн; во однос на начинот на кој примарниот еталон [83] ги регистрира конкретните фракции на вкупната моќност [55-56]. Врз интензитетот на грешка, особено при помал фундаментален фазен агол φ_1 , влијае и постоењето на т.н. моќност на дисторзија, равенки (2.31) и (2.34), која фигурира во вкупната референтна "неактивна" моќност.

Прикажаните криви на грешка, наликуваат на кривите илустрирани на сликите 6.12 – 6.15, од претходното потпоглавје, кои се однесуваат на инструмент со алтернативен принцип на мерење. Имено, при голем удел на реактивна моќност во системот, кога φ_1 е помеѓу ±60° и ±90°, се регистрираат релативно константни отстапувања, кои не надминуваат -12 %, и во случајот на виши хармоници од само еден (5^{ти}) ред, присутни во тест сигналите, и при испитни напони и струи со повеќе хармониски компоненти, со случаен удел и случајно почетно фазно поместување. При фундаментални фазни агли помали од ±60°, доаѓа до нагло зголемување на грешките, а екстремната вредност е регистрирана за најмал удел на реактивна моќност во системот. Тоа е точката која одговара на $\varphi_1=15^\circ$, во тест процедурата со испитни сигнали во кои фигурираат виши хармоници од 5^{ти} ред, со *THD*_U=10 % и *THD*_I=40 %. Измерената екстремна грешка, $\delta_{QF,max}$, изнесува -51,24 %. За конкретното испитување, во доменот на капацитивно оптоварување, се детектира значително помала максимална грешка, која изнесува околу -30 %.



Слика 6.21 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}, \delta_{QF}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со виши хармоници од 5^{mu} ред



Слика 6.22 Релативни грешки во мерењето реактивна моќност со ZERA COM3003, кога $Q_{C300}=Q_{F,3f}, \delta_{QF}=f(\varphi_1)$, при тест сигнали со случајно хармониско изобличување

Како што може да се забележи од Слика 6.22, во тест процедурата во која напоните и струите поседуваат случајно хармониско изобличување, диспозицијата на максимални грешки е речиси симетрична во делот на капацитивно и индуктивно оптоварување на примарниот еталон [83]. Ова се должи на влијанието на фазните разлики θ_{ih} - θ_{uh} , на вишите хармоници од различен ред, кои за дел од компонентите се во опсегот помеѓу 0° и 180°, а за останатите се помеѓу 180° и 360°. Може да се забележи дека самите екстремни отстапувања се помали во однос на резултатите добиени во процедурата со виши хармоници од само еден ред, што повторно алудира на фактот дека постои делумно меѓусебно поништување на различните компоненти на грешка, поради нивниот спротивен предзнак.

На самиот крај од ова изложување, ќе бидат математички евалуирани грешките, кои би се јавиле, во хармониски – изобличени услови, доколку се изврши споредба помеѓу одзивот на еден уред, со познат мерен алгоритам, и покажувањето на референтен инструмент, кој поседува алтернативен принцип на мерење. Начинот на приказ на реактивната моќност и кај двата типа уреди, базирани на аналогно или дигитално поместување на мерените напони (односно струи), е верификуван преку претходно реализираните мерни постапки.

Доколку уредот кој е предмет на испитување е базиран на аналогно (фазно) поместување на мерените напони (или струи), односно доколку истиот ја регистрира реактивната моќност/енергија врз база на мерниот алгоритам претставен со изразот (3.11), а референтниот уред е базиран на дигитално прилагодување на мерените сигнали, равенка (3.12), релативната грешка би изнесувала:

$$\delta_{Q} = \frac{Q_{UUT} - Q_{REF}}{Q_{REF}} \cdot 100 = \frac{\sum_{h=1}^{n} \frac{3U_{h}I_{h}\sin\varphi'_{h}}{h} - \sum_{h=1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi'_{h}}{\sum_{h=1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi'_{h}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\sum_{h>1}^{n} U_{h}I_{h} \left[\frac{\sin\varphi'_{h}}{h} - (\pm\sin\varphi'_{h})\right]}{\sum_{h=1}^{n} \pm U_{h}I_{h}\sin\varphi'_{h}} \cdot 100 , \qquad (6.13)$$

107

каде што Q_{UUT} е трифазната реактивна моќност, измерена со уредот кој е предмет на испитување, а Q_{REF} е трифазната реактивна моќност, измерена со инструментот кој поседува повисока класа на точност. Компонентите на вкупната грешка, равенка (6.13), кои произлегуваат од вишите хармоници од ред 3, 7, 11, 15 итн., изнесуваат:

$$\delta_{Qh} = \frac{\frac{h+1}{h} U_h I_h \sin \varphi'_h}{\sum_{h=1}^n \pm U_h I_h \sin \varphi'_h} \cdot 100 , \qquad (6.14)$$

додека компонентите на вкупната грешка, кои се однесуваат на преостанатите непарни виши хармоници, од ред 5, 9, 13, 17 итн., ќе бидат еднакви на:

$$\delta_{Qh} = \frac{\frac{1-h}{h} U_h I_h \sin \varphi'_h}{\sum_{h=1}^n \pm U_h I_h \sin \varphi'_h} \cdot 100.$$
(6.15)

Доколку се примени тест процедура, која вклучува единствено виши хармоници од 5^{ти} ред [27], со удел $u_{5,\%}=10$ % и $i_{5,\%}=40$ %, и доколку се усвои апроксимацијата (6.6), според која фундаменталната реактивна моќност е значително поголема од моќноста која произлегува од вишите хармоници, грешката (6.13) го добива следниот облик:

$$\delta_Q \approx \frac{\frac{1-5}{5}U_5 I_5 \sin \varphi_5'}{U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = -\frac{4}{5} \cdot \frac{u_{5,\%}}{100} \cdot \frac{i_{5,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = -3.2 \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1}.$$
 (6.16)

Грешката (6.16) ќе биде максимална во мерните точки кои одговараат на најмала фундаментална реактивна моќност. Доколку се применат истите мерни точки од претходно прикажаниот испитен протокол, $\sin\varphi_1$ ќе има минимална вредност за $\varphi_1=\pm 15^\circ$. Ако се изберат θ_{i5} и θ_{u5} , така што $\varphi'_5 = 90^\circ$ или $\varphi'_5 = 270^\circ$, се добива максималното отстапување:

$$\delta_{Q,max} \approx \left| -3.2 \cdot \frac{\sin(\pm 90^\circ)}{\sin(\pm 15^\circ)} \right| = 12,36 \%.$$
 (6.17)

Во спротивен случај, доколку уредот кој се испитува ја регистрира реактивната моќност врз база на дигитално (временско) поместување на мерените напони (или струи), а референтниот уред е базиран на аналогна преобразба на мерените сигнали, грешката поради неусогласеноста на алгоритмите за мерење на двата уреди, го поседува следниот облик:

$$\delta_{Q} = \frac{Q_{UUT} - Q_{REF}}{Q_{REF}} \cdot 100 = \frac{\sum_{h=1}^{n} \pm 3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}' - \sum_{h=1}^{n} \frac{3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}'}{h}}{\sum_{h=1}^{n} \frac{3U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}'}{h}} \cdot 100 = \frac{\sum_{h>1}^{n} U_{h}I_{h} \left[(\pm \sin\varphi_{h}') - \frac{\sin\varphi_{h}'}{h} \right]}{\sum_{h=1}^{n} \frac{U_{h}I_{h}\sin\varphi_{h}'}{h}} \cdot 100 .$$
(6.18)
Компонентите на вкупната грешка, кои произлегуваат од вишите хармоници од 3^{ти}, 7^{ми}, 11^{ти}, 15^{ти} итн., ред во сигналите, го поседуваат следниот облик:

$$\delta_{Qh} = -\frac{h+1}{h} \frac{U_h I_h \sin \varphi'_h}{\sum_{h=1}^n \frac{U_h I_h \sin \varphi'_h}{h}} \cdot 100 , \qquad (6.19)$$

додека компонентите на вкупната грешка, кои се однесуваат на присуството на преостанатите непарни виши хармоници, од ред 5, 9, 13, 17, итн., можат да се прикажат како:

$$\delta_{Qh} = \frac{h-1}{h} \frac{U_h I_h \sin \varphi'_h}{\sum_{h=1}^n \frac{U_h I_h \sin \varphi'_h}{h}} \cdot 100 , \qquad (6.20)$$

Ако се применат тест сигналите со виши хармоници од 5^{ти} ред [27], со $u_{5,\%}=10$ % и $i_{5,\%}=40$ %, и доколку се усвои дека референтната моќност е приближно еднаква на фундаменталната моќност, грешката ќе го добие следниот облик:

$$\delta_Q \approx \frac{5-1}{5} \cdot \frac{U_5 I_5 \sin \varphi_5'}{U_1 I_1 \sin \varphi_1} \cdot 100 = \frac{4}{5} \cdot \frac{u_{5,\%}}{100} \cdot \frac{i_{5,\%}}{100} \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1} \cdot 100 = 3.2 \cdot \frac{\sin \varphi_5'}{\sin \varphi_1}, \tag{6.21}$$

која е максимална за $\varphi_1 = \pm 15^\circ$, односно $\varphi'_5 = \pm 90^\circ$. Максималната, пресметковно добиена грешка, повторно изнесува $\pm 12,36$ %.

7. МОДЕЛИРАЊЕ БУЏЕТ НА МЕРНА НЕОДРЕДЕНОСТ

7.1. Општ пристап кон изразувањето мерна неодреденост во несинусни услови

Анализата на одзивот на еден инструмент за мерење електрична моќност и/или енергија, во несинусни услови, не може да се комплетира без приказ на буџетот на мерна неодреденост [89]. Имајќи предвид дека овие инструменти се проектирани примарно за работа во синусен работен режим, математичката евалуација на мерната неодреденост би требало да се базира на надополнување на постоечката спецификација, согласно присуството на компоненти со фреквенција различна од фундаменталната во мерните сигнали. Со други зборови, неодреденоста придружена кон измерената моќност/енергија, која произлегува од фундаменталните напони и струи, треба да се надополни со компоненти, кои се однесуваат на можностите и начинот на регистрирање на вишите хармоници.

Во постоечката литература, прикажани се различни пристапи за пресметка и приказ на мерната неодреденост, при мерење на конкретните физички величини во несинусен работен режим. Во публикацијата [21], презентиран е начин за пресметка на мерната неодреденост при мерењето активна моќност, базиран на разложување на компонентите на моќност во фреквенциски домен. Согласно документираниот пристап, на компонентите од вкупната активна моќност, придружени се мерни неодредености, кои се дополнително разложени на три, меѓусебно некорелирани, компоненти, а истите произлегуваат од можностите за мерење напони и струи со фреквенција h пати поголема од фундаменталната, како и можноста за снимање на фазните агли помеѓу нив. Во конкретниот пример [21], не се наведени понатамошни детали околу математичкиот приказ и начинот на комбинирање на влијателните фактори, придружени кон мерењето поединечни параметри на сигналите. Алтернативен начин за пресметка на мерната неодреденост, при мерење електрична моќност и/или енергија во несинусен режим, е презентиран во [22]. Во конкретната публикација, вкупната неодреденост е изразена во форма на параметар кој претставува есенцијален дел на постапка на испитување броило за активна енергија, со стандардизирани и нестандардизирани тест сигнали. Вкупната мерна неодреденост е аналитички претставена како комбинирана мерна неодреденост [65-66, 90-92], која е резултат на две меѓусебно некорелирани компоненти. Првата компонента е изразена согласно Тип А пристапот за евалуација, и истата се јавува поради статистичко расејување на резултатите од поединечните мерења [66, 90-93]. Втората компонента произлегува од перформансите на испитниот систем во доменот на репродукција на сигнали со хармониско изобличување. Иако, во самата публикација не е прикажан математички модел за евалуација на оваа компонента на неодреденост, насоките за нејзината пресметка, можат да се пронајдат во техничкото упатство на калибраторот CALMET C300 [68], кој е употребен како референтен уред во наведените испитувања. Проблематиката поврзана со начинот на пресметка на мерната неодреденост, при мерење активна електрична моќност, во синусни и несинусни услови, е опфатена и во трудовите [94-96]. Од аспект на мерењето моќност во несинусни услови, особено значајни се заклучоците презентирани во [95], каде вкупната мерна неодреденост е анализирна од перспектива на присуството на поединечни виши хармоници и вкупното хармониско изобличување на напонските сигнали. Во буџетот на вкупната

неодреденост прикажан е интензитетот на компонентите кои се однесуваат на мерење поединечни хармоници, заедно со распределбите кои се усвоени при нивната евалуација.

Во понатамошното изложување ќе биде прикажан оригинално развиен математички модел за приказ на мерната неодреденост, при мерењето електрична моќност/енергија, во несинусни услови, кој треба да се надоврзе на резултатите од спроведените испитувања. Како појдовна точка за формулација на целокупниот буџет ќе бидат усвоени принципите за пресметка на мерна неодреденост презентирани во Упатството за изразување мерна неодреденост [66]. Поединечните фактори кои влијаат на мерењето различни параметри на сигналите ќе бидат математички формулирани како стандардни компоненти на мерна неодреденост, согласно Тип А и Тип Б пристапите за евалуација [66, 90-92]. Заради поедноставен пристап, за да се избегне постапката на аналитичко изразување корелациони фактори помеѓу поединечните параметри на сигналите, пресметката на комбинираната мерна неодреденост ќе се сведе на поврзување на влијателните фактори, земајќи притоа дека тие се меѓусебно некорелирани, или третирајќи ги истите како да се во потполна корелација. Имајќи го предвид фактот дека вкупната (активна или реактивна) моќност/енергија зависи од повеќе различни параметри на сигналите, почетна точка во пресметката претставува одредувањето поединечни влијателни фактори, кои се однесуваат на недостатоците при мерењето на конкретните, фундаментални и хармониски, величини. За овие влијателни фактори математички да се прикажат како компоненти на мерна неодреденост, придружени кон мерената моќност/енергија, потребно е да се изразат и соодветни коефициенти на чувствителност [66, 90]. Евалуацијата на коефициентите на чувствителност е базирана на равенките прикажани во второто поглавје од докторскиот труд, имајќи предвид дека истите го сочинуваат основниот математички апарат за анализа на вишите хармоници.

Со цел спроведување на анализата на врвно метролошко ниво и заради можноста заклучоците од истата да се искористат за дополнување на ланецот на метролошка следливост во Лабораторијата [97-105], во несинусни услови, математичкиот модел за приказ на мерната неодреденост ќе биде валидиран со лабораторискиот примарен еталон, ZERA COM3003 [83]. Примената на конкретниот уред во понатамошната анализа е примарно оправдана поради можноста за независно мерење релативен удел и почетно фазно поместување на поединечни виши хармоници, покрај можноста за директно мерење активна и реактивна моќност, преку усвојување различни алгоритми за мерење. Дополнително, во спецификацијата на конкретниот уред [83], наведена е можност за мерење сигнали со фреквенции до 3500 Hz. Примарниот еталон на ЛЕМ, во претходното изложување, беше употребен за валидација на математичкиот модел за приказ на отстапувањата при мерење активна и реактивна на конкретниот уред [83], наведена е можност за мерење сигнали со фреквенции до 3500 Hz. Примарниот еталон на ЛЕМ, во претходното изложување, беше употребен за валидација на математичкиот модел за приказ на отстапувањата при мерење активна и реактивна моќност, со напони и струи со случајно хармониско изобличување, што овозможува моделот на мерна неодреденост да се валидира во идентични сигнални услови.

Заради претходно утврдените разлики помеѓу измерената и зададената моќност, како и заклучоците, според кои конкретните разлики се должат првенствено на мерењето фазен агол помеѓу вишите хармоници, мерната неодреденост ќе биде математички евалуирана поаѓајќи од можноста за директно мерење релативен удел и почетно фазно поместување на конкретните компоненти. Инструментот ќе биде дополнително поставен и во режим за директно мерење ефективна вредност на применетите напони и струи и фазен агол помеѓу фундаменталните компоненти. Во зависност од усвоениот начин за приказ на активната и реактивната моќност, вкупната мерна неодреденост ќе биде пресметана аналитички, со

преносна функција која подразбира и евалуација на коефициенти на чувствителност, за пренос на поединечните влијателни фактори, помеѓу измерените и пресметаните величини. Иако моделот за приказ на активната и реактивната моќност, во несинусни услови, е изразено нелинеарен, вкупната неодреденост ќе се пресмета согласно заклучоците презентирани во [66] кои се однесуваат на линеарен систем. Конкретната апроксимација е усвоена заради поедноставување на целокупната анализа, имајќи предвид дека компонентите на моќност кои произлегуваат од вишите хармоници се значително помали од моќноста која произлегува од напоните и струите со фреквенција од 50 Hz.

7.2. Математичко моделирање на мерната неодреденост

7.2.1. Мерна неодреденост на директно мерените големини

Математичкиот модел за евалуација на мерната неодреденост, придружена кон мерената моќност и/или енергија, ќе биде базиран на директно регистрирање на следните параметри на напонските и струјните сигнали:

- ефективни вредности на применетите напони и струи, *U* и *I*,
- фазен агол помеѓу фундаменталните компоненти на напонот и струјата, φ_1 ,
- удел и почетен фазен агол на вишите хармоници во напонските сигнали, $u_{h,\%}$ и θ_{uh} ,
- удел и почетен фазен агол на вишите хармоници во струјните сигнали, $i_{h,\%}$ и θ_{ih} .

Мерната неодреденост, придружена кон секоја директно мерена големина, во општ случај означена како *Y*, се пресметува како комбинирана неодреденост [66, 90] од четири меѓусебно некорелирани компоненти:

$$u_{C,Y} = \sqrt{u_{A,Y}^2 + u_{R,Y}^2 + u_{SP,Y}^2 + u_{CL,Y}^2},$$
(7.1)

каде што:

- *и*_{*A,Y*} е компонента која се пресметува согласно Тип А пристапот за евалуација и истата е резултат на статистичкото расејување на поединечните отчитувања на мерената големина *Y* во однос на средната вредност,
- *и*_{*R,Y*} е компонента која се однесува на ограничената резолуција на инструментот при отчитување на конкретната величина,
- *иSP,Y* е компонента која произлегува од техничката спецификација на инструментот,
- *u*_{CL,Y} е компонента која се однесува на следливоста на инструментот, односно претставува неодреденост отчитана од неговиот сертификат за калибрација.

Приказот и означувањето на поединечните влијателни фактори, како и начинот за нивно групирање со цел добивање комбинирана неодреденост, придружена кон директно мерените големини, се изложени во Додаток В, на крајот од докторската дисертација.

Мерната неодреденост, пресметана според Тип А пристапот за евалуација, се изразува како стандардна девијација на аритметичката средина, добиена во рамките на *М* мерења за величината *Y* [90]:

$$u_{A,Y} = \sqrt{\frac{1}{M(M-1)} \sum_{j=1}^{M} (Y_j - Y_M)^2},$$
(7.2)

каде што со Y_j се означени поединечните отчитувања при мерењето на Y, а Y_M е аритметичката средина од M мерења. За пресметка на оваа компонента на мерна неодреденост се усвојува Гаусова или Студентова распределба [66, 74], имајќи предвид дека секое поединечно отчитување може да поседува случајна вредност во околината на аритметичката средина, со специфичен степен на веројатност.

Втората компонента на мерна неодреденост се јавува поради ограничената резолуција на инструментот во доменот на мерење некоја конкретна величина Y. За пресметка на $u_{R,Y}$, вообичаено се усвојува правоаголна (униформна) распределба [65-66, 90], со полуширина еднаква на половина резолуција:

$$u_{R,Y} = \frac{R}{2k_R} = \frac{R}{2 \cdot \sqrt{3}},$$
(7.3)

каде што R е резолуцијата на инструментот, а k_R е факторот на покривање, кој за правоаголна распределба изнесува $\sqrt{3}$. За математичка евалуација на оваа компонента на мерна неодреденост се усвојува правоаголна распределба, имајќи предвид дека мерената големина може да поседува било каква вредност во интервалот на отчитувањето, плус/минус половина резолуција, со еднаков степен на веројатност. За примарниот еталон на ЛЕМ [83], при отчитување ефективна вредност на трифазните напони и струи, резолуцијата се менува во зависност од избраното мерно подрачје. При мерење удел и почетно фазно поместување на поединечни виши хармоници, резолуцијата е константна и истата изнесува 0,01 %, односно 0,01°, респективно.

Пристапот за математичка евалуација на преостанатите две компоненти на мерна неодреденост од равенката (7.1), *u*_{SP,Y} и *u*_{CL,Y}, зависи од големината на која истите се препишуваат и од начинот на кој се прикажани соодветните податоци во техничката спецификација, односно сертификатот за калибрација, на анализираниот инструмент.

Кога се мери удел на поединечен хармоник во напонските или струјните сигнали, $y_{h,\%}$, овие две компоненти на мерна неодреденост се пресметуваат според равенките:

$$u_{SP,yh,\%} = \left\{ \left| \frac{\partial y_{h,\%}}{\partial Y_1} u_{SP,Y1} \right| + \left| \frac{\partial y_{h,\%}}{\partial Y_h} u_{SP,Yh} \right| \right\},\tag{7.4}$$

$$u_{CL,yh,\%} = \left\{ \left| \frac{\partial y_{h,\%}}{\partial Y_1} u_{CL,Y1} \right| + \left| \frac{\partial y_{h,\%}}{\partial Y_h} u_{CL,Yh} \right| \right\}.$$
(7.5)

Парцијалните изводи, во равенките (7.4) и (7.5), $\partial y_{h,\%}/\partial Y_1$ и $\partial y_{h,\%}/\partial Y_h$, наречени и коефициенти на чувствителност [66], се пресметуваат од изразите (2.3) или (2.4), во зависност од тоа дали станува збор за струен или напонски сигнал. Во равенката (7.4), $u_{SP,Y1}$ и $u_{SP,Yh}$ се стандардни мерни неодредености кои произлегуваат од спецификацијата на инструментот, а се однесуваат на можностите за мерење фундаментална компонента на

сигналот, односно компонента со фреквенција h пати поголема од фундаменталната. Во равенката (7.5), стандардните мерни неодредености $u_{CL,Y1}$ и $u_{CL,Yh}$, се однесуваат на можностите за мерење на истите параметри на сигналите, но истите произлегуваат од сертификатот за калибрација на инструментот. Параметрите Y_1 и Y_h , кои фигурираат и во двете равенки, се ефективната вредност на фундаменталната компонента на сигналот, односно ефективната вредност на соодветниот виш хармоник од ред h. Поединечните неодредености, кои се однесуваат на фундаменталната компонента и на вишиот хармоник од ред h, се третираат како меѓусебно корелирани, имајќи предвид дека промената на било кој параметар од равенките (2.3) и (2.4) ќе резултира со промена и на другиот, за константна ефективна вредност на сигналите.

Имајќи го предвид техничкото упатство на ZERA COM3003 [83], неодреденоста која произлегува од спецификацијата на уредот во доменот на мерење ефективна вредност на вишиот хармоник од ред h, $u_{SP,Yh}$, може да се изрази како стандардна комбинирана неодреденост од три, меѓусебно некорелирани, компоненти [65]:

$$u_{SP,Yh} = \sqrt{u_{AC,Yh}^2 + u_{ST,Yh}^2 + u_{T,Yh}^2},$$
(7.6)

каде што:

- *и_{AC,Yh}* е компонента која произлегува од декларираните граници на грешка на мерниот уред,
- *иST,Yh* е компонента која произлегува од неговата долгорочна стабилност,
- *и*_{*T,Yh*} е компонента која се однесува на влијанието на температурните флуктуации врз точноста на мерењето.

Поединечните неодредености од изразот (7.6), во спецификацијата на еталонот [83] се прикажани во проширена форма и релативен облик: $U_{AC,\%}$, $U_{ST,\%}$ и $U_{T,\%}$. Истите во стандарден облик, како што фигурираат во равенката (7.6), може да се пресметаат како:

$$u_{AC,Yh} = \frac{U_{AC,\%}}{100} \cdot \frac{Y_h}{k_{SP}} \cdot h , \qquad (7.7)$$

$$u_{ST,Yh} = \frac{U_{ST,\%}}{100} \cdot \frac{Y_h}{k_{SP}} \cdot y \cdot h , \qquad (7.8)$$

$$u_{T,Yh} = \frac{U_{T,\%}}{100} \cdot \frac{Y_h}{k_{SP}} \cdot \Delta t \cdot h , \qquad (7.9)$$

каде што за одредување на факторот на покривање k_{SP} , во недостаток на дополнителни информации, е усвоена правоаголна распределба, а со тоа и вредност $\sqrt{3}$. Во равенките (7.7)-(7-9) *h* го претставува редот на хармоникот кој се разгледува, у е параметар кој го прикажува бројот на години поминати од последната калибрација на еталонот, а Δt е фактор кој се однесува на температурните флуктуации на мерното место. За пресметка на неодреденоста, придружена кон мерењето фундаментална компонента, $u_{SP,Y1}$, може да се искористи истиот пристап, презентиран во равенката (7.6), така што поединечните компоненти $u_{AC,Y1}$, $u_{ST,Y1}$ и $u_{T,Y1}$ се пресметуваат согласно равенките (7.7)-(7.9), заменувајќи Y_1 , наместо Y_h , и h=1. Доколку равенките (7.6)-(7.9) се заменат во изразот (7.4), мерната неодреденост придружена кон мерењето релативен удел на виш хармоник од ред h, која произлегува од спецификацијата на инструментот, го добива следниот облик:

$$u_{SP,yh,\%} = \left\{ \left| \left(-\frac{Y_h}{Y_1^2} \cdot 100 \right) \left(\frac{Y_1}{100} \cdot C \right) \right| + \left| \left(\frac{100}{Y_1} \right) \left(\frac{Y_h}{100} \cdot h \cdot C \right) \right| \right\} = \frac{y_{h,\%}}{100} (1+h)C , \qquad (7.10)$$

каде што C е константа која произлегува од спецификацијата на мерниот уред. За ZERA COM3003 [83], константата C, согласно претходното изложување, го поседува следниот облик:

$$C = \frac{1}{k_{SP}} \sqrt{\left(U_{AC,\%}\right)^2 + \left(U_{ST,\%} \cdot y\right)^2 + \left(U_{T,\%} \cdot \Delta t\right)^2}.$$
 (7.11)

Равенките (7.10) и (7.11) укажуваат дека неодреденоста $u_{SP,yh,\%}$ зависи исклучиво од редот, *h*, и вредноста за релативниот удел на напонскиот или струјниот хармоник од ред *h*, $y_{h,\%}$, и податоците наведени во спецификацијата на инструментот, но не и од ефективните вредности Y_h и Y_1 , имајќи предвид дека истите не се предмет на директно мерење.

Компонентите на мерна неодреденост, прикажани во равенката (7.5), кои произлегуваат од калибрацијата на мерилото, $u_{CL,Yh}$ и $u_{CL,Y1}$, може да се изразат на следниот начин:

$$u_{CL,Yh} = \frac{U_{CL,\%}}{100} \cdot \frac{Y_h}{k_{CL}} \cdot h , \qquad (7.12)$$

каде што $U_{CL,\%}$ е проширена мерна неодреденост, прикажана во релативен облик, која се препишува на мерењето напон или струја, и истата се отчитува од последниот сертификат за калибрација на применетиот инструмент. Во равенката (7.12) k_{CL} е факторот на покривање, кој одговара на усвоената дистрибуција и интервал на доверливост. Вообичаено, во сертификатите за калибрација, мерната неодреденост се прикажува со усвојување Гаусова распределба [65], а интервалот на доверливост за кој истата се соопштува, соодветствува на приближно 95 %. Доколку, се усвојат конкретните заклучоци, k_{CL} би изнесувал приближно 2. За пресметка на компонентата $u_{CL,Y1}$, во изразот (7.12) наместо Y_h , би требало да се замени Y_1 , а редот на хармоникот треба да се земе за h=1. Ако се замени изразот (7.12), дополнително прилагоден и за пресметка на $u_{CL,Y1}$, во равенката (7.5), за калибрациската неодреденост, придружена кон мерењето релативен удел на виш хармоник од ред h, се добива вредност која зависи исклучиво од неговиот ред, интензитет и податоците кои фигурираат во сертификатот за калибрација:

$$u_{CL,yh,\%} = \left\{ \left| \left(-\frac{Y_h}{Y_1^2} \cdot 100 \right) \left(\frac{U_{CL,\%}}{k_{SP}} \cdot \frac{Y_1}{100} \right) \right| + \left| \left(\frac{100}{Y_1} \right) \left(\frac{U_{CL,\%}}{k_{SP}} \cdot \frac{Y_h}{100} \cdot h \right) \right| \right\} = \frac{y_{h,\%}}{100} (1+h) \frac{U_{CL,\%}}{k_{CL}}.$$
(7.13)

Пристапот за пресметка на *u*_{SP,Y} и *u*_{CL,Y}, при мерење ефективна вредност на трифазните напони и струи, се сведува на директна примена на вредностите наведени во

спецификацијата и сертификатот за калибрација на анализираниот инструмент, во доменот на мерење на конкретните електрични величини. Имајќи ја предвид спецификацијата на ZERA COM3003 [83], компонентата на мерна неодреденост, која произлегува од истата, може да се изрази како:

$$u_{SP,Y} = \sqrt{u_{AC,Y}^2 + u_{ST,Y}^2 + u_{T,Y}^2}, \qquad (7.14)$$

каде што поединечните стандардни неодредености го имаат истото значење кое што е претходно наведено во објаснувањето на изразот (7.6), и истите се пресметуваат како:

$$u_{AC,Y} = \frac{U_{AC,\%}}{100} \cdot \frac{Y}{k_{SP}},$$
(7.15)

$$u_{ST,Y} = \frac{U_{ST,\%}}{100} \cdot \frac{Y}{k_{SP}} \cdot y , \qquad (7.16)$$

$$u_{T,Y} = \frac{U_{T,\%}}{100} \cdot \frac{Y}{k_{SP}} \cdot \Delta t .$$
 (7.17)

Поединечните параметри, кои ги прикажуваат: декларираните граници на грешка, $U_{AC,\%}$, долгорочната стабилност, $U_{ST,\%}$, и влијанието на температурата врз мерните можности на примарниот еталон, $U_{T,\%}$, заедно со годините изминати од претходната калибрација, у, и температурните флуктуации на мерното место, Δt ; го имаат истото значење како што е назначено за равенките (7.7)-(7.9). Во изразите (7.15)-(7.17), со Y е означена ефективната вредност на трифазните напони или струи. Доколку се заменат овие равенки во изразот (7.14), неодреденоста која произлегува од наведената спецификација на инструментот, придружена кон мерените ефективни вредности на трифазните напони, односно струи, го добива следниот облик:

$$u_{SP,Y} = \frac{Y}{k_{SP} \cdot 100} \sqrt{\left(U_{AC,\%}\right)^2 + \left(U_{ST,\%} \cdot y\right)^2 + \left(U_{T,\%} \cdot \Delta t\right)^2}.$$
 (7.18)

Неодреденоста која произлегува од калибрацијата на мерниот уред се пресметува како:

$$u_{CL,Y} = \frac{U_{CL,\%}}{100} \cdot \frac{Y}{k_{CL}},\tag{7.19}$$

каде што $U_{CL,\%}$ е проширена неодреденост, во релативен облик, отчитана од сертификатот за калибрација на инструментот, придружена кон мерењето напон, односно струја, а k_{CL} е факторот на покривање, кој изнесува 1,96 или 2, доколку се усвои Гаусова распределба со интервал на доверливост од 95 %, односно 95,4 %.

Мерната неодреденост која произлегува од спецификацијата, односно калибрацијата, на мерилото, а која се придружува на мерењето фазен агол, се изразува преку единствена формулација, независно дали станува збор за мерење фазен агол помеѓу фундаменталните

напони и струи, φ_1 , или почетни фазни поместувања на вишите хармоници во однос на компонентите со фреквенција од 50 Hz, θ_{uh} и θ_{ih} . Во спецификацијата на примарниот еталон [83], податокот за границите на грешка, при мерењето фазен агол, е прикажан во апсолутен облик, $U_{SP,a}$, па според тоа, општиот израз за пресметка на конкретната компонента на неодреденост може да се прикаже како:

$$u_{SP,\alpha} = \frac{U_{SP,\alpha}}{k_{SP}} \cdot h , \qquad (7.20)$$

каде што k_{SP} го има идентичното значење и вредност, како што е објаснето погоре. Изразот (7.20) е општа формулација и во истиот *h* претставува ред на хармоникот доколку се врши пресметка на мерната неодреденост, придружена кон θ_{uh} и θ_{ih} . Доколку е потребно да се пресмета соодветната компонента на неодреденост, придружена кон мерењето фундаментален фазен агол, φ_1 , *h* се заменува со вредност 1.

Калибрациската мерна неодреденост, при мерењето фазен агол, во конкретната мерна конфигурација, е невозможно директно да се изрази, имајќи предвид дека во сертификатот за калибрација на ZERA COM3003 истата не е експлицитно наведена. Она што може да се примени во дадениот случај, е да се употреби техничката документација на еталонот кој е земен како референтен уред во конкретната постапка и од истата да се отчитаат границите на грешка, при мерењето фазен агол. Калибрациската мерна неодреденост, $u_{CL,a}$, во општ случај, ќе се пресмета согласно изразот (7.20), во кој, за $U_{SP,a}$, ќе се заменат границите на грешка при мерењето фазен агол, преземени од техничката спецификација на референтниот инструмент, употребен во калибрацијата на примарниот еталон на Лабораторијата.

7.2.2. Мерна неодреденост придружена кон пресметковно добиените големини

Комбинираните стандардни неодредености, придружени кон големините кои се мерат директно, пресметани согласно равенката (7.1) и заклучоците изнесени во претходното потпоглавје, можат да послужат за изразување на неодреденостите, придружени кон различни параметри на сигналите, кои се добиени пресметковно. За таа цел се применуваат преносни функции, кои вклучуваат коефициенти на чувствителност, за чија пресметка пак се користат равенките прикажани во второто поглавје од докторскиот труд.

Од комбинираните неодредености, придружени кон измерените релативни удели на вишите хармоници во применетите напони, односно струи, може да се пресмета неодреденоста во пресметката на вкупното хармониско изобличување, *THD*, на сигналите. Оваа мерна неодреденост, треба да го обедини влијанието на сите виши хармоници, кои фигурираат во сигналите:

$$u_{THD,Y} = \sqrt{\sum_{h>1}^{n} \left(\frac{\partial THD_Y}{\partial y_{h,\%}} \cdot u_{C,yh,\%}\right)^2},$$
(7.21)

каде што поединечните хармоници се третираат како меѓусебно некорелирани, имајќи предвид дека, при константна ефективна вредност на сигналите, промената на уделот на еден виш хармоник не влијае врз промената на уделот на друг виш хармоник. Коефициентите на чувствителност $\partial THD_Y/\partial y_{h,\%}$ се пресметуваат од равенките (2.9) или

(2.10), во зависност од тоа дали пресметковно се третираат напонските или струјните изобличувања. Доколку се изразат овие парцијални изводи и истите се заменат во изразот (7.21), неодреденоста придружена кон пресметаното вкупно хармониско изобличување изнесува:

$$u_{THD,Y} = \frac{1}{THD_Y} \sqrt{\sum_{h>1}^n (y_{h,\%} \cdot u_{C,yh,\%})^2} .$$
(7.22)

Мерната неодреденост, пресметана согласно равенката (7.22), може понатаму да се примени во евалуацијата на неодреденоста придружена кон аналитички добиената ефективна вредност на фундаменталните хармоници на напоните и струите:

$$u_{C,Y1} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_1}{\partial Y} \cdot u_{C,Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_1}{\partial T H D_Y} \cdot u_{THD,Y}\right)^2},$$
(7.23)

а притоа, парцијалните изводи $\partial Y_1/\partial Y$ и $\partial Y_1/\partial THD_Y$ се изразуваат од равенките (2.11) или (2.12), кои ги поврзуваат фундаменталната компонента на сигналот, Y_1 , неговата ефективна вредност, Y, и вкупното хармониско изобличување, THD_Y . Неодреденоста, придружена кон измерената ефективна вредност на сигналот, се пресметува согласно равенката (7.1), притоа применувајќи ги заклучоците презентирани во изразите (7.2), (7.3) и (7.14)-(7.19), додека деталите за пресметка на $u_{THD,Y}$ се илустрирани преку равенките (7.21) и (7.22). Двете компоненти на мерна неодреденост, кои фигурираат во равенката (7.23), се третираат како меѓусебно некорелирани, имајќи предвид дека, согласно поставките на мерниот систем, промената на хармониското изобличување, не резултира со промена на ефективната вредност на сигналите.

Следниот чекор во евалуацијата на мерна неодреденост, при мерењето активна, односно реактивна, моќност, во хармониски — изобличени услови, се однесува на пренесување на досега претставените влијателни фактори, кон ефективните вредности на вишите хармоници, Y_h . Мерната неодреденост, придружена кон пресметаната ефективна вредност на вишиот хармоник од ред h, се изразува како комбинирана стандардна неодреденост од две меѓусебно корелирани компоненти:

$$u_{C,Yh} = \left\{ \left| \frac{\partial Y_h}{\partial Y_1} \cdot u_{C,Y1} \right| + \left| \frac{\partial Y_h}{\partial y_{h,\%}} \cdot u_{C,Yh,\%} \right| \right\},\tag{7.24}$$

кои се однесуваат на пресметковно добиената фундаментална вредност на напонот, односно струјата, и измерениот процентуален удел на вишиот хармоник од ред h. Овие две неодредености се третираат како да се во меѓусебна потполна корелација, бидејќи согласно поставките на мерниот систем, промената на уделот на вишиот хармоник, ќе резултира со промена на ефективната вредност на фундаменталниот напон, односно струја, при константна ефективна вредност на применетите сигнали. Парцијалните изводи, $\partial Y_h/\partial Y_1$ и $\partial Y_h/\partial y_{h,\%}$, се изразуваат од равенките (2.3) или (2.4), во зависност од тоа дали станува збор за анализа на напонски или струјни виши хармоници.

За пресметка на вкупната мерна неодреденост во мерењето активна и/или реактивна моќност, покрај математичка евалуација на неодреденостите придружени кон ефективните вредности на вишите хармоници и фундаменталните компоненти, потребно е аналитички да се изразат и влијателните фактори кои се придружуваат кон пресметката на фазните агли помеѓу напоните и струите со фреквенција h пати поголема од основната. Неодреденоста која се пропишува на оваа големина може да се изрази како:

$$u_{C,\varphi h} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_h}{\partial \varphi_1} \cdot u_{C,\varphi 1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_h}{\partial \theta_{uh}} \cdot u_{C,\theta uh}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_h}{\partial \theta_{ih}} \cdot u_{C,\theta ih}\right)^2}, \qquad (7.25)$$

каде што поединечните парцијални изводи, $\partial \varphi_h / \partial \varphi_1$, $\partial \varphi_h / \partial \theta_{uh}$ и $\partial \varphi_h / \partial \theta_{ih}$, се пресметуваат согласно изразот (2.15). Трите стандардни компоненти, u_{C,φ_1} , $u_{C,\theta_{uh}}$ и $u_{C,\theta_{ih}}$ се пресметани согласно заклучоците за евалуација на мерна неодреденост при директно мерење фазен агол, презентирани во потпоглавјето 7.2.1. и истите се третираат како меѓусебно некорелирани, имајќи предвид дека φ_1 , θ_{uh} и θ_{ih} се независно мерени величини. За пресметка на парцијалните изводи можен е и алтернативен приод, доколку однапред се усвојат заклучоците презентирани во петтото и шестото поглавје од докторскиот труд, според кои еден инструмент ги регистрира вишите хармоници како компоненти чиишто фазори ротираат со спротивна насока во однос на фазорите на фундаменталните компоненти. Во тој случај референтна равенка за пресметка на коефициентите на чувствителност е (5.15), меѓутоа нејзината примена нема да резултира со промена на вредноста на u_{C,φ_h} , имајќи предвид дека во изразот (7.25) фигурира квадратот на поединечните неодредености.

Потпоглавјето во кое е прикажан трансферот на мерната неодреденост, помеѓу параметрите на сигналите кои се добиваат пресметковно, се затвора со претставување аналитички изрази за пресметка на компонента на мерна неодреденост, која се препишува на пресметаните фактори на моќност, $\cos \varphi_h$ и $\sin \varphi_h$. И покрај тоа што факторите на моќност кои произлегуваат од фазното поместување помеѓу вишите хармоници на напоните и струите немаат физичко значење, соодветните компоненти на неодреденост ќе бидат понатаму искористени во конечната евалуација. Равенките за пресметка на овие компоненти на неодреденост го поседуваат следниот облик:

$$u_{cPF,h} = \left| \frac{\cos(\varphi_h + k_{\varphi h} u_{C,\varphi h}) - \cos \varphi_h}{k_{\varphi h}} \right|, \qquad (7.26)$$

$$u_{sPF,h} = \left| \frac{\sin(\varphi_h + k_{\varphi h} u_{C,\varphi h}) - \sin \varphi_h}{k_{\varphi h}} \right|, \qquad (7.27)$$

каде што $k_{\phi h}$ е фактор на покривање, чијашто вредност е детерминирана од усвоената распределба за приказ на варијациите на аголот ϕ_h . Имајќи предвид дека комбинираната неодреденост на ϕ_h се пресметува од три меѓусебно некорелирани компоненти, а секоја од нив од уште четири меѓусебно некорелирани компоненти, и земајќи ги предвид заклучоците од Централната гранична теорема (англ. Central Limit Theorem) [66, 90], за приказ на варијациите на ϕ_h се усвојува Гаусовата дистрибуција. Доколку се усвои интервал на доверливост од 95,4 %, за приказ на резултатите, на факторот на покривање $k_{\phi h}$ од равенките (7.26) и (7.27) му се доделува вредност 2. Во пресметката на мерната неодреденост, придружена кон фундаменталните фактори на моќност, $\cos\varphi_1$ и $\sin\varphi_1$, за u_{C,φ_1} се заменува вредноста добиена согласно равенката (7.1) и заклучоците кои се валидни за директното мерење фазен агол од поглавјето 7.2.1.

7.2.3. Мерна неодреденост придружена кон измерената активна или реактивна моќност

Вкупната мерна неодреденост, придружена кон мерењето моќност, се пресметува согласно аналитичкиот израз кој го претставува алгоритамот на мерење, имплементиран во самиот мерен уред. Доколку инструментот е наменет за мерење активна моќност, тогаш мерната неодреденост придружена кон компонентата од вкупната активна моќност, која произлегува од вишите хармоници на напонот и струјата од ред *h*, се пресметува како:

$$u_{C,Ph} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_h}{\partial U_h} \cdot u_{C,Uh}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_h}{\partial I_h} \cdot u_{C,Ih}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_h}{\partial \cos \varphi_h} \cdot u_{CPF,h}\right)^2}, \qquad (7.28)$$

каде што $u_{C,Uh}$ и $u_{C,Ih}$ се пресметуваат согласно равенката (7.24), а $u_{cPF,h}$ се пресметува согласно изразот (7.26). Доколку станува збор за пресметка на мерната неодреденост придружена кон фундаменталната активна моќност, тогаш поединечните компоненти $u_{C,Uh}$ и $u_{C,Ih}$ стануваат $u_{C,U1}$ и $u_{C,I1}$, па истите се пресметуваат со равенката (7.23). За пресметка пак на $u_{cPF,1}$, се применуваат претходно усвоените заклучоци за измените кои треба да ги претрпи изразот (7.26). Коефициентите на чувствителност, $\partial P_h/\partial U_h$, $\partial P_h/\partial I_h$ и $\partial P_h/\partial \cos \varphi_h$, се изразуваат од равенката (2.17), имајќи предвид дека, мерниот алгоритам на дигиталните уреди за мерење активна моќност, (3.7), е во согласност со дефиницијата за соодветната големина во несинусни услови. Вкупната неодреденост, придружена кон измерената активна моќност, по фаза, се пресметува како аритметичка сума на стандардните комбинирани неодредености, кои се препишуваат на моќностите од поединечните виши хармоници:

$$u_{C,Pf} = \sum_{h=1}^{n} |u_{C,Ph}|, \qquad (7.29)$$

а при тоа, поединечните компоненти $u_{C,Ph}$ се третираат како да се во потполна корелација, имајќи предвид дека истите се меѓусебно математички поврзани преку ефективните вредности на фундаменталните напон и струја, и фазниот агол помеѓу нив. Проширената мерна неодреденост се пресметува со множење на $u_{C,Pf}$ со фактор на покривање k_P :

$$U_{C,Pf} = k_P \cdot u_{C,Pf} = k_P \sum_{h=1}^{n} |u_{C,Ph}|, \qquad (7.30)$$

чијашто вредност произлегува од усвоената резултантна дистрибуција. Доколку се следат заклучоците од Централната гранична теорема [66, 90] и доколку се усвои Гаусова дистрибуција за приказ на можните варијации во мерењето на *P_f*, на факторот на покривање

му се доделува вредност 2, за притоа да се постигне интервал на доверливост од 95,4 %. Мерната неодреденост придружена кон трифазната активна моќност се пресметува како збир од неодреденостите придружени кон измерените активни моќности во трите фази:

$$U_{C,P3f} = k_P\{|u_{C,PfA}| + |u_{C,PfB}| + |u_{C,PfC}|\},$$
(7.31)

или доколку системот е симетричен:

$$U_{C,P3f} = k_P \{3 | u_{C,Pf} | \}.$$
(7.32)

Доколку инструментот е наменет за мерење реактивна моќност/енергија, компонентата на мерна неодреденост придружена кон фракцијата од вкупната моќност, која произлегува од вишите хармоници од ред *h*, се пресметува како:

$$u_{C,Qh} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_h}{\partial U_h} \cdot u_{C,Uh}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_h}{\partial I_h} \cdot u_{C,Ih}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_h}{\partial \sin \varphi_h} \cdot u_{SPF,h}\right)^2},$$
(7.33)

каде што поединечните неодредености во изразот (7.33) се пресметуваат како што е објаснето погоре, а парцијалните изводи, $\partial Q_h/\partial U_h$, $\partial Q_h/\partial I_h$ и $\partial Q_h/\partial \sin \varphi_h$ се изразуваат од равенката која одговара на имплементираниот алгоритам за мерење во конкретниот уред. Доколку инструментот е базиран на аналогно (фазно) прилагодување на сигналите, за пресметка на коефициентите на чувствителност се поаѓа од равенката (3.11). Од друга страна, во случај кога инструментот е базиран на временско поместување на мерените напони, или струи, т.е. на дигитално прилагодување на влезните сигнали, парцијалните изводи од изразот (7.33) се изразуваат од равенката (3.12). Понатамошната евалуација на комбинираната и проширената неодреденост, по фаза, како и на неодреденоста придружена кон мерената трифазна моќност, е идентична како и во случајот на мерење активна моќност:

$$u_{C,Qf} = \sum_{h=1}^{n} |u_{C,Qh}|, \qquad (7.34)$$

$$U_{C,Qf} = k_Q \cdot u_{C,Qf} = k_Q \sum_{h=1}^n |u_{C,Qh}|, \qquad (7.35)$$

$$U_{C,Q3f} = k_Q \{ |u_{C,QfA}| + |u_{C,QfB}| + |u_{C,QfC}| \},$$
(7.36)

$$U_{C,Q3f} = k_Q \{ 3 | u_{C,Qf} | \}, \tag{7.37}$$

каде што на факторот на покривање k_Q му се доделува вредност, согласно заклучоците презентирани за евалуацијата на k_P .

7.3. Практична валидација на математичкиот модел

Валидацијата на математичкиот модел ќе се реализира преку анализа на промената на мерната неодреденост, придружена кон мерењето трифазна активна моќност со примарниот еталон на ЛЕМ, ZERA COM3003 [83], во несинусни услови, и споредба на овие вредности со резултати, добиени согласно пристап за евалуација, валиден во синусни услови. За да се обезбеди континуитет со претходните истражувања, како испитни сигнали ќе бидат применети напони и струи чиешто хармониско изобличување кореспондира со сигналите опфатени со "Првиот сет тест сигнали", од валидацискиот дел на петтото поглавје. Заради прегледност, во Табела 7.1 прикажани се уделите на поединечните виши хармоници во применетите сигнали, заедно со нивното почетно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти. За валидација на математичкиот модел, спроведени се мерења во девет мерни точки, кои одговараат на различен фундаментален фазен агол φ_1 , помеѓу -60° и 60°, со чекор од 15°, слично како и во мерните постапки илустрирани во петтото поглавје од докторската дисертација. Пресметката на мерната неодреденост е реализирана во трифазен симетричен режим на испитување, а ефективните вредности на применетите напони и струи изнесуваат 230 V, односно 5 А.

h	$u_{h,\%}$ (%)	$ heta_{uh}(\degree)$	$i_{h,\%}$ (%)	$ heta_{ih}(\degree)$
3	8,2	65	34,9	119
5	4,4	247	15,1	194
7	1,15	174	8,5	48
9	0,78	12	2,45	7
11	0,12	325	0,87	204
<i>THD</i> (%)	9,4	41	39	,05

Табела 7.1 Удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници во испитните сигнали

Првиот дел од анализата се однесува на споредба на интензитетот на поединечните влијателни фактори, при директното мерење релативен удел на вишите хармоници во напонските и струјните сигнали. Мерната точка за која се прикажани резултатите, одговара на фундаментални напони и струи кои се меѓусебно во фаза. Како што може да се забележи од Табела 7.2, кај напонските сигнали, резолуцијата претставува влијателен фактор кој доминантно придонесува во вкупниот буџет. Овој феномен е особено присутен при мерењето виши хармоници од повисок ред, поради тоа што нивниот удел е незначителен во однос на фундаменталните напони. Кај хармониците од 3^{ти} и 5^{ти} ред се забележува дека калибрациската неодреденост претставува исто така значителна компонента во вкупниот буџет. Во конкретната мерна точка не се забележуваат флуктуации во отчитувањето на резултатите, т.е. мерната неодреденост пресметана согласно Тип А пристапот за евалуација е нула, за било кој виш хармоник, присутен во спектарот на напонските сигнали.

Малку поинаква диспозиција е регистрирана во случајот на мерење удел на вишите струјни хармоници. Доминантната компонента на мерна неодреденост, во овој случај, варира во зависност од редот на хармоникот кој се разгледува. Кај хармониците со пониска фреквенција, најголема вредност поседува мерната неодреденост која произлегува од калибрацијата на мерниот уред, иако и компонентите кои се резултат на техничката спецификација и резолуцијата на мерниот уред поседуваат интензитет од ист ред на големина како и $u_{CL,ih,\%}$. Кај вишите хармоници кои се карактеризираат со помал релативен удел (h=9 и h=11) резолуцијата на мерилото го превзема приматот на доминантен влијателен фактор, кој го обликува целокупниот буџет на мерна неодреденост, имајќи предвид дека $u_{SP,ih,\%}$ и $u_{CL,ih,\%}$ се пропорционални на $i_{h,\%}$. За конкретната испитна точка, при мерење на вишиот хармоник од $5^{\text{ти}}$ ред, регистрирана е Тип А компонента, која се должи на мала флуктуација во поединечните отчитувања. Иако, разликите помеѓу поединечните отчитувања се минимални, Тип А компонентата поседува речиси идентичен удел во целокупниот буџет како и неодреденоста, која произлегува од ограничената резолуција.

		L	l _{h,%}		<i>ih</i> ,%			
h	<i>u_{A,uh,%}</i> (%)	<i>u_{R,uh,%}</i> (%)	<i>u_{SP,uh,%}</i> (%)	<i>u_{CL,uh,%}</i> (%)	U _{A,ih,%} (%)	u _{R,ih,%} (%)	<i>u</i> _{SP,ih,%} (%)	u _{CL,ih,%} (%)
3	0	0,0029	0,00063	0,002	0	0,0029	0,0045	0,0085
5	0	0,0029	0,00051	0,0016	0,002	0,0029	0,0029	0,0055
7	0	0,0029	0,00018	0,00057	0	0,0029	0,0022	0,0042
9	0	0,0029	0,00015	0,00048	0	0,0029	0,00079	0,0015
11	0	0,0029	0,000028	0,000088	0	0,0029	0,00034	0,0064

Табела 7.2 Буџет на мерна неодреденост при мерењето $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$ за $\varphi_1=0^{\circ}$

Во Табела 7.3 прикажан е интензитетот на поединечните компоненти на мерна неодреденост, при директното мерење на $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$, во точка која соодветствува на φ_1 =60°. Од прикажаните резултати, може да се заклучи дека распределбата на доминантните влијателни фактори речиси и да не се разликува во однос на податоците прикажани во Табела 7.2, за φ_1 =0°. Во конкретниот случај, се регистрира Тип А мерна неодреденост при снимање на третиот напонски хармоник, која поседува речиси идентична вредност како и резолуциската компонента. Од друга страна, кај струјните хармоници не се регистрирани никакви флуктуации помеѓу поединечните отчитувања.

Табела 7.	.3]	Буџет	на	мерна	неодреденост	при	мерењето	<i>и_h,% и</i>	i _h ,% 3a	$\varphi_1 = 60$
-----------	------	-------	----	-------	--------------	-----	----------	--------------------------	----------------------	------------------

		ι	<i>t</i> h,%		<i>ih</i> ,%				
h	<i>u_{A,uh,%}</i> (%)	<i>u_{R,uh,%}</i> (%)	USP,uh,% (%)	UCL,uh,% (%)	UA,ih,% (%)	U _{R,ih,%} (%)	USP,ih,% (%)	UCL,ih,% (%)	
3	0,0024	0,0029	0,00063	0,002	0	0,0029	0,0045	0,0085	
5	0	0,0029	0,00051	0,0016	0	0,0029	0,0029	0,0055	
7	0	0,0029	0,00018	0,00057	0	0,0029	0,0022	0,0042	
9	0	0,0029	0,00015	0,00048	0	0,0029	0,00079	0,0015	
11	0	0,0029	0,000028	0,000088	0	0,0029	0,00034	0,00064	

Општиот заклучок од презентираните резултати е дека доминантната компонента на мерна неодреденост, при мерењето удел на вишите хармоници во напонските и струјните сигнали, зависи примарно од амплитудата на самиот хармоник. За конкретниот инструмент, доколку уделот на поединечниот хармоник е помал од приближно 5 %, ниската резолуција доминантно го обликува целокупниот буџет. При поголем интензитет на вишиот хармоник, до израз доаѓаат и влијателните фактори кои произлегуваат од спецификацијата и калибрацијата на еталонот. На ова треба да се надоврзе и евентуалното постоење Тип А компонента на мерна неодреденост. Поради ниската резолуција од 0,01 %, и најмала промена во отчитувањата резултира со зголемување на вкупната мерна неодреденост, нешто што е валидно за било каков мерен инструмент. Конкретниот заклучок е валидиран преку анализа на промената на мерната неодреденост, пресметана во постапка на калибрација на мултиметри со различна резолуција и истиот е публикуван во трудот [2].

Интензитетот на поединечните мерни неодредености, кои се препишуваат на директното мерење почетно фазно поместување на вишите хармоници, е прикажан во Табела 7.4 и Табела 7.5. Табелата 7.4 се однесува на мерна точка во која фундаменталните компоненти на сигналите се меѓусебно во фаза, т.е. за случај кога $\varphi_1=0^\circ$. Резултатите во Табела 7.5 се прикажани за најекстремните услови на мерење, кога фундаменталните напони и струи се фазно поместени за агол $\varphi_1=60^\circ$.

	$ heta_{uh}$				$ heta_{ih}$			
h	UA,θuh (°)	ИR,θuh (°)	USP,θuh (°)	ИСL,θuh (°)	<i>U</i> A,θih (°)	<i>ИR,θih</i> (°)	USP,θih (°)	<i>UCL,θih</i> (°)
3	0	0,0029	0,0087	0,0087	0,002	0,0029	0,0087	0,0087
5	0,0024	0,0029	0,014	0,014	0,0068	0,0029	0,014	0,014
7	0,004	0,0029	0,02	0,02	0,0055	0,0029	0,02	0,02
9	0,0063	0,0029	0,026	0,026	0,0066	0,0029	0,026	0,026
11	0,0051	0,0029	0,032	0,032	0,013	0,0029	0,032	0,032

Табела 7.4 Буџет на мерна неодреденост при мерењето θ_{uh} и θ_{ih} за $\varphi_1=0^\circ$

Табела 7.5 Буџет на мерна неодреденост при мерењето θ_{uh} и θ_{ih} за $\varphi_1=60^\circ$

		θ	uh		$ heta_{ih}$			
h	<i>ИА,θић</i> (°)	<i>ИR,θuh</i> (°)	USP,θuh (°)	<i>UCL,θuh</i> (°)	<i>U</i> A, <i>θih</i> (°)	<i>UR,θih</i> (°)	USP,θih (°)	ИСL,θih (°)
3	0,0024	0,0029	0,0087	0,087	0,002	0,0029	0,0087	0,0087
5	0,0024	0,0029	0,014	0,014	0,0049	0,0029	0,014	0,014
7	0,0068	0,0029	0,02	0,02	0,0063	0,0029	0,02	0,02
9	0,0068	0,0029	0,026	0,026	0,0051	0,0029	0,026	0,026
11	0,021	0,0029	0,032	0,032	0,013	0,0029	0,032	0,032

Како што може да се забележи од табелите 7.4 и 7.5, буцетот на мерна неодреденост е речиси идентично распределен, независно дали станува збор за мерење почетно фазно поместување на виш напонски или струен хармоник. За конкретната мерна конфигурација, доминантните влијателни фактори произлегуваат од спецификацијата на мерилото, односно неговиот сертификат за калибрација. Овие две компоненти на мерна неодреденост, согласно равенката (7.20), не зависат од вредноста на θ_{uh} или θ_{ih} , туку единствено од фреквенцијата на вишите хармоници. Од таа причина, компонентите *usp.θuh* и *usp.θih*, односно компонентите $u_{CL,\theta uh}$ и $u_{CL,\theta ih}$, се меѓусебно еднакви, за било кој ред виши хармоници, h. Од табелите 7.4 и 7.5 може да се забележи дека меѓусебно еднакви се и спецификациската и калибрациската мерна неодреденост за било кој виш хармоник. Овој феномен е последица на фактот што калибрацијата на примарниот еталон на ЛЕМ е спроведена со уред кој поседува речиси идентични метролошки карактеристики како и конкретната ZERA СОМ3003 [83]. Преостанатите две компоненти, u_A и u_R , имаат помала вредност и речиси незначително придонесуваат во вкупниот буџет. Последното тврдење е особено валидно за резолуциската компонента, која, освен при мерењето почетни фазни агли кај хармониците од ред h=3, поседува вредност која е цел ред на големина помала од u_{SP} и u_{CL} . Интензитетот на компонентата добиена согласно Тип А методот за евалуација, зависи од степенот на флуктуација на поединечните отчитувања. Доколку се споредат податоците од двете табели, може да се извлече заклучок дека оваа мерна неодреденост е поизразена кога U_1 и *I*₁ се меѓусебно фазно поместени.

Резултатите од валидациската постапка, во форма на проширена комбинирана мерна неодреденост, придружена кон измерената трифазна активна моќност, се прикажани на Слика 7.1. Неодреденоста за различен фазен агол φ_1 , е претставена во релативен облик, $U_{C,P\%}$, во однос на измерената трифазна активна моќност, P_{3f} :



$$U_{C,P\%} = \frac{U_{C,P3f}}{P_{3f}} \cdot 100 .$$
 (7.38)

Слика 7.1 Проширена комбинирана неодреденост придружена кон мерената активна моќност, пресметана согласно директен (валиден за синусни услови) и индиректен пристап на евалуација

На Слика 7.1 илустрирани се две криви на зависност $U_{C,P\%}=f(\varphi_1)$. Првата крива, прикажана со правоаголни точки, ја претставува проширената комбинирана мерна неодреденост, придружена кон измерената трифазна активна моќност, пресметана согласно принцип за евалуација валиден во синусни сигнални услови. Според оваа методологија, комбинираната мерна неодреденост се пресметува согласно изразот (7.1), а при тоа се поаѓа од директните отчитувања на инструментот во доменот на мерење трифазна активна моќност. Мерната неодреденост Тип А се пресметува со равенката (7.2), во која треба да се заменат поединечните отчитувања $P_{3f,i}$, и усреднетата вредност добиена од M мерења, $P_{3f,M}$. Резолуциската компонента се пресметува со изразот (7.3), каде што за R се заменува резолуцијата на примарниот еталон во доменот на мерење трифазна активна моќност, за применетата комбинација на напонско и струјно мерно подрачје. Преостанатите две компоненти од равенката (7.1) се пресметуваат согласно изразите (7.14)-(7.19), наведени во дискусијата која се однесува на директното мерење ефективна вредност на применетите напони и струи. Треба да се напомене дека во конкретните изрази треба да се заменат податоците од спецификацијата на еталонот [83], UAC., UST., и UT., односно неговата калибрација, U_{CL,%}, кои се однесуваат на мерењето активна моќност. За пресметка на проширената неодреденост, повторно се усвојуваат заклучоците од Централната Гранична теорема [66, 90], и вкупната распределба која служи за приказ на варијациите на P_{3f} се третира како Гаусова. Доколку се усвои интервал на доверливост од 95,4 %, факторот на покривање k_P , со кој треба да се помножи вредноста добиена согласно равенката (7.1), за да се добие проширена мерна неодреденост, изнесува 2. Основниот недостаток на конкретниот пристап за пресметка на мерна неодреденост, при мерење активна моќност во несинусни услови, е фактот што во вкупниот буџет не фигурира ниту еден влијателен фактор кој укажува на присуството на виши хармоници од различен ред, со различен удел во сигналите и различно фазно поместување во однос на фундаменталните компоненти. Конкретниот заклучок може да се извлече и од сликата 7.1, од која може да се утврди дека зависноста $U_{C,P\%}=f(\varphi_1)$ е константна, а евентуалните минимални варијации во некои мерни точки се должат исклучиво на промена на мерната неодреденост од Тип А. Деталниот опис на директната постапка за евалуација на мерна неодреденост, при мерењето активна моќност во синусни референтни услови, е прикажана во публикацијата под реден број [1].

Зависноста $U_{C,P\%}=f(\varphi_1)$, претставена преку точки со триаголна форма на Слика 7.1, се однесува на проширената мерна неодреденост, пресметана согласно предложениот математички модел од потпоглавјето 7.2. На сликата е наведено дека оваа крива на зависност произлегува од индиректна пресметка, имајќи го предвид разложувањето на сигналите на поединечни хармоници и аналитичката евалуација на влијателните фактори, придружени кон секој од нив. Може да се заклучи дека, пристапот за пресметка на мерна неодреденост, согласно предложениот математички модел, дава пореалистичен приказ на можностите за мерење активна моќност, при хармониски – изобличени сигнали. Имено, проширената неодреденост, е речиси двојно поголема од вредноста добиена согласно поедноставениот пристап, валиден за синусни услови, во мерната точка која соодветствува на $\cos \varphi_1 = 1$. Имајќи ги предвид резултатите од петтото поглавје на докторскиот труд, како и барањата на стандардите [25-27] и препораката [28], во оваа мерна точка се очекуваат најмали отстапувања на мерните уреди во однос на референтните нагодувања на испитниот систем. Со промена на φ_1 , во индуктивна или капацитивна насока, се зголемува и вкупната мерна неодреденост, па истата е речиси четири пати поголема во однос на вредноста пресметана согласно поедноставениот пристап, во најекстремните мерни точки од тест процедурата, кога $\varphi_1 = \pm 60^\circ$. Според анализата спроведена во петтото поглавје, токму за конкретните мерни точки, измерените грешки се вообичаено најголеми.

7.4. Промена на вкупната мерна неодреденост при различен интензитет на хармониските параметри

Во понатамошното изложување ќе бидат прикажани варијациите на вкупната мерна неодреденост, придружена кон мерената активна моќност со примарниот еталон на ЛЕМ [83], при промена на вредноста на различни параметри на вишите хармоници. Сетовите податоци, кои ќе бидат илустрирани во продолжение, се добиени пресметковно, согласно спроведена симулација која го опфаќа математичкиот модел, разработен во потпоглавјето 7.2. Компонентите на неодреденост кои произлегуваат од реални мерења (Тип A мерна неодреденост, придружена на уделот и почетното фазно поместување на вишите хармоници), се заменети со екстремните вредности од анализата на претходно направените мерења. Конкретната апроксимација подразбира дека мерната неодреденост пресметана согласно Тип A пристапот за евалуација е 0 %, кога се разгледува директното мерење релативен удел на вишите хармоници во сигналите, имајќи предвид дека варијациите во отчитувањата на $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$ се мали и се среќаваат само во изолирани случаеви. Усвоените вредности за $u_{A,0uh}$ и $u_{A,0ih}$ кореспондираат со вредностите презентирани во Табела 7.5, за секој ред виши хармоници посебно.

Поради поголема прегледност на резултатите и поради остварување континуитет со анализата на грешки (Поглавја 5 и 6 од докторскиот труд), симулацијата на мерната неодреденост, придружена кон мерената трифазна активна моќност, е спроведена во услови на напонски и струјни сигнали во кои фигурираат виши хармоници од само еден ред, покрај фундаменталните компоненти. Вкупното хармониско изобличување е ограничено на $THD_U=10$ %, односно на $THD_I=40$ %. Анализата е спроведена во симетрични услови, преку усвојување напони од 230 V, односно струи од 5 А. Резултатите од симулациите ќе бидат прикажани графички. Поединечните илустрации произлегуваат од симулации реализирани преку промена на различен параметар на вишите хармоници, додека на секоја илустрација се презентирани повеќе криви на мерна неодреденост, исцртани од спроведена пресметка во повеќе различни мерни точки. Засебните криви одговараат на конкретна вредност на променливиот хармониски параметар, а поединечните мерни точки се идентични како во делот на анализата на грешки кај броилата за активна енергија, односно истите одговараат на различен фундаментален фазен агол φ_1 , во интервалот помеѓу -60° и 60°, со чекор од 15°.

На Слика 7.2 и Слика 7.3, прикажани се резултати од симулација, добиени за различни почетни фазни поместувања на струјните и напонските виши хармоници од 5^{тн} ред, соодветно. Треба да се напомене дека и во двата случаи, во сигналите фигурираат само виши хармоници од 5^{тн} ред и нивните удели изнесуваат $u_{5,\%}=10$ %, односно $i_{5,\%}=40$ %. Почетното фазно поместување на напонскиот хармоник, θ_{u5} , во симулацијата која одговара на промелнив почетен фазен агол на струјниот хармоник, θ_{i5} , изнесува 0°. Почетното фазно поместување на струјниот хармоник, θ_{i5} , во симулацијата која одговара на променлив почетен фазен агол на напонскиот хармоник, θ_{u5} , изнесува 60°. Според равенките (7.1)-(7.3) и изразот (7.20) комбинираната мерна неодреденост, придружена кон мерењето почетен фазен агол на виш, струен или напонски, хармоник, не зависи од вредноста на самото фазно поместување. Доминантните компоненти на оваа неодреденост, согласно резултатите прикажани во Табела 7.4 и Табела 7.5, се препишуваат на спецификацијата на мерилото, односно на резултатите од неговата калибрација, и зависат исклучиво од податоците наведени во техничкото упатство од производителот и сертификатот за калибрација. Влијанието на интензитетот на фазните агли, θ_{uh} или θ_{ih} , е евентуално присутно преку мерната неодреденост пресметана согласно Тип А методот за евалуација, но во конкретниот случај оваа компонента е утврдена експериментално, како обединета мерна неодреденост (англ. pooled uncertainty) [90], врз база на претходно направени мерења. Како што може да се забележи од Слика 7.2 и Слика 7.3, промената на фазните агли θ_{i5} и θ_{u5} , сепак резултира со промена на вкупната неодреденост, а самата промена е поизразена при поголем фундаментален фазен агол, φ_1 . Почетните фазни поместувања на вишите хармоници од 5^{ти} ред го определуваат фазниот агол помеѓу напоните и струите со фреквенција од 250 Hz, φ_5 , па согласно равенката (7.26), придонесуваат и за промена на мерната неодреденост $u_{cPF,5}$, која се препишува на факторот на моќност, $\cos \varphi_5$. Промената е поизразена при помал удел на активна моќност во системот, поради тоа што во конкретните мерни точки, е поголем и уделот на мерната неодреденост која се препишува на фундаменталниот фактор на моќност, $u_{cPF,1}$.

Иако вредностите на θ_{i5} и θ_{u5} минимално влијаат врз промената на неодреденоста придружена кон мерената активна моќност, нивната разлика влијае на обликот на кривата на неодреденост. Кога θ_{i5} и θ_{u5} се избрани така што нивната разлика е помеѓу 0° и 180°, мерната точка која одговара на најголема мерна неодреденост се поместува во насока на капацитивно оптоварување. Конкретниот феномен може да се потврди од поединечните криви, илустрирани на Слика 7.2, кои одговараат на вредност за θ_{i5} од: 30° и 90°; имајќи предвид дека $\theta_{u5}=0°$, односно од кривите илустрирани на Слика 7.3, кои одговараат на вредност за θ_{u5} од: 270°, 330°, 0° и 30°; имајќи предвид дека $\theta_{i5}=60°$. Во случајот кога $\theta_{i5}-\theta_{u5}$ е помеѓу 180° и 360°, максималната мерна неодреденост се поместува во насока на мерните точки кои одговараат на индуктивно оптоварување. Ова се потврдува од кривите илустрирани на Слика 7.2, кои одговараат на вредност за θ_{i5} од: 270° и 330°; односно од кривата илустрирана на Слика 7.3, која одговара на вредност за θ_{i5} од: 90°. Во случај кога $\theta_{i5}-\theta_{u5}=0°$, кривата на неодреденост се симетрична во однос на ординатната оска.



Слика 7.2 Промена на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, за различни вредности на θ_{i5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{u5}=0^{\circ}$



Слика 7.3 Промена на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, за различни вредности на θ_{u5} , $u_{5,\%}=10$ %, $i_{5,\%}=40$ %, $\theta_{i5}=60^{\circ}$

На Слика 7.4 и Слика 7.5 прикажани се варијациите на проширената комбинирана неодреденост, придружена кон мерената трифазна активна моќност, во однос на промената на релативниот удел на струјните и напонските виши хармоници од 5^{ти} ред, соодветно. Почетните фазни поместувања на вишите хармоници имаат фиксни вредности од θ_{i5} =60° и θ_{u5} =0°. Според резултатите презентирани во Табела 7.2 и Табела 7.3, доминантната компонента на неодреденост во мерењето релативен удел на вишите хармоници, произлегува од калибрацијата на самото мерило. Оваа компонента, согласно аналитичкиот израз за пресметка (7.13), линеарно зависи од уделот на вишиот хармоник, па имајќи предвид дека целокупниот модел за евалуација е претставен преку апроксимации валидни за линеарен модел, промената на $u_{5,\%}$ и $i_{5,\%}$ ќе придонесе за консекутивна промена на $U_{C,P\%}$.



Слика 7.4 Промена на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, за различни вредности на i5,%, u5,%=10 %, θ_{u5} =0°, θ_{i5} =60°



Слика 7.5 Промена на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, за различни вредности на и5,%, i5,%=40 %, θ_{u5} =0°, θ_{i5} =60°

Линеарната зависност помеѓу вкупната неодреденост и промената на релативниот удел на еден виш хармоник е особено изразена при симулацијата која се однесува на варијации на вишиот струен хармоник од 5^{ти} ред. Ова се должи на фактот што во буџетот на мерна неодреденост при мерење на $i_{5,\%}$, значителен удел има и компонентата која произлегува од спецификацијата на еталонот, која пак, согласно равенката (7.10), повторно линеарно зависи од вредноста на $i_{5,\%}$. Кај симулацијата која се однесува на променлив удел на напонскиот хармоник од 5^{ти} ред, постои значителна компонента која произлегува од резолуцијата на еталонот и истата не зависи од вредноста на $u_{5,\%}$, па на тој начин вкупната неодреденост, во поединечни мерни точки, се одржува на релативно константна вредност. Генерален заклучок кој може да се извлече и од двете симулации е дека промената на $U_{C,P\%}$ е позначителна во оние точки кои се однесуваат на помал удел на активна моќност во системот, бидејќи во вкупниот буџет, значително придонесува и компонентата придружена кон мерењето фундаментален фазен агол.

Последната симулација ја прикажува промената на вкупната мерна неодреденост, придружена кон мерењето трифазна активна моќност со примарниот еталон на ЛЕМ [83], во однос на редот на вишите хармоници, присутни во напонските и струјните сигнали. Резултатите од оваа симулација се прикажани на Слика 7.6. И во овој случај, виши хармоници од само еден ред се присутни во сигналите, а нивниот релативен удел изнесува $u_{h,\%}=10\%$, односно $i_{h,\%}=40\%$. Почетните фазни поместувања на вишите хармоници, се исто така константни и истите изнесуваат $\theta_{uh}=0^{\circ}$ и $\theta_{ih}=60^{\circ}$.

Според математичкиот модел, прикажан во потпоглавјето 7.2, редот на вишите хармоници присутни во сигналите, *h*, линеарно влијае врз речиси секоја компонента на мерна неодреденост, било да станува збор за големина која се мери директно, или за параметар, кој се добива пресметковно. Согласно заклучоците од спроведените мерења за валидација на моделот, редот на вишите хармоници директно влијае врз доминантните компоненти на мерна неодреденост, во мерењето релативен удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници. Според тоа, очекувано е дека и вкупната мерна неодреденост линеарно ќе расте со пораст на фреквенцијата на хармониците, при константно вкупно хармониско изобличување на сигналите. Резултатите прикажани на

Слика 7.6, ја потврдуваат оваа претпоставка за мерните точки кои одговраат на голем удел на активна моќност во системот, кога φ_1 е во интервалот помеѓу -30° и 30°. При поголем фундаментален фазен агол, до израз доаѓа компонентата на мерна неодреденост, придружена кон неговото мерење, односно компонентата која се препишува на пресметката на фундаменталниот фактор на моќност, која не зависи од редот на хармониците присутни во сигналите. Дополнително, изразот (2.15) покажува дека, при различен ред виши хармоници, се менува и фазниот агол помеѓу напоните и струите со фреквенција h пати поголема од фундаменталната, дури и при фиксни вредности за φ_1 , θ_{uh} и θ_{ih} . Ова значи дека промена ќе претрпи и компонентата на мерна неодреденост која се препишува на пресметката на факторот на моќност на вишите хармоници, и_{сPF,h}, чијшто интензитет не зависи само линеарно од редот на хармониците, туку на нејзе влијае и промената на φ_h според косинусен закон. Феноменот наречен помала вкупна мерна неодреденост, при виши хармоници со поголема фреквенција, е присутен во мерната точка која одговара на $\varphi_1 = 60^\circ$, илустрирана на Слика 7.6. Имено, за конкретнот фазен агол, се забележува дека мерната неодреденост е најголема, кога во сигналите се присутни виши хармоници од 9^{ти} ред, додека вредностите добиени при симулациите со виши хармоници од 7^{ми} и 11^{ти} ред се помали и приближно меѓусебно еднакви.



Слика 7.6 Промена на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, за различен ред виши хармоници, h, $u_{h,\%}=10$ %, $i_{h,\%}=40$ %, $\theta_{uh}=0^{\circ}$, $\theta_{ih}=60^{\circ}$

На крајот од ова поглавје, можат да се наведат воочените предности и недостатоци на предложениот математички модел за евалуација на мерната неодреденост, во несинусни услови. Основната предност на овој модел е фактот што истиот обединува повеќе фактори кои влијаат на мерењето поединечни параметри на сигналите, преку едноставен математички апарат. Пристапот на пресметка, базиран на [66], е добро познат на научната јавност, и истиот е често применуван во бројни гранки на метрологијата, за најразлични научни или апликативни цели. Конкретниот начин на евалуација, придонесува да во вкупната мерна неодреденост, се јават компоненти кои носат информација за степенот на хармониско изобличување на сигналите, бројот на виши хармоници присутни во брановите облици на напоните и струите, нивниот релативен удел и почетно фазно поместување. На тој начин се постигнува проширување на неодреденоста во мерењето, во однос на базната

спецификација на инструментите, која вообичаено е претставена исклучиво за синусен работен режим. Вака наведениот пристап за пресметка, може понатаму да се примени за воспоставување ланец на метролошка следливост во лабораторијата, во доменот на мерење бројни електрични величини, при хармониски изобличувања на сигналите.

Од друга страна, главниот недостаток на предложениот математички модел е обемот на пресметки кои треба да се извршат, особено доколку во спектарот на сигналите фигурираат повеќе компоненти со фреквенција различна од фундаменталната. Моделот е валидиран со користење на инструмент кој има можност за регистрирање на вишите хармоници во фреквенциски домен, и за истиот да биде применлив и кај уреди кои единствено директно ја прикажуваат мерената моќност и/или енергија, потребно е да се применат дополнителни апроксимации и метролошко искуство. Имено, евалуацијата на мерната неодреденост, придружена кон мерењето релативен удел и почетно фазно поместување кај вишите хармоници, во таков случај, треба да се базира на емпириски метод, односно на постоечка историја на записи за однесувањето на конкретниот мерен уред, во различни хармониски – изоблечени услови.

Математичкиот модел е отворен за понатамошно надополнување и со останати влијателни фактори, кои би се идентификувале во рамки на идни повторени испитувања. Во насока на негово усовршување може да се пристапи кон аналитичка евалуација на корелациони коефициенти кои би резултирале со поверен приказ на реалната поврзаност помеѓу компонентите на неодреденост, придружени кон поединечните сигнални параметри. Имајќи предвид дека, бројни влијателни фактори се аналитички евалуирани како компоненти на мерна неодреденост, за моделирање на резултантната дистрибуција која ги прикажува варијациите на мерената моќност и/или енергија, може да се примени и нумеричка пресметка, базирана на Монте Карло симулацијата [106] или Бајесовата статистика [107].

Аналитичкиот модел за евалуација на мерна неодреденост, неговата валидација со примена на реални мерења и симулацијата на промената на вкупната неодреденост, придружена кон мерената активна моќност, се документирани во публикациите со реден број [6] и [8].

8. ЗАКЛУЧОК

Во докторската дисертација, спроведена е теоретска и практична анализа на одзивот на различни инструменти за мерење електрична моќност и/или енергија, во хармониски – изобличени услови. Фокусот на истражувањето е насочен кон последната генерација, дигитални мерила, поради фактот што истите, ги истиснуваат од употреба постарите, електромеханички и аналогни електронски уреди. Теоретскиот дел од истражувањето е ориентиран во насока на сублимирање на досегашните сознанија околу можностите за мерење електрична моќност/енергија, во несинусни услови, со постоечките, комерцијално достапни инструменти. Практичните испитувања се спроведени во строго контролирани, лабораториски услови, со мерна опрема во посед на акредитирана лабораторија за калибрација на инструменти и еталони за мерење или репродукција на електрични величини. Мерната опрема, која е употребена за целите на конкретното истражување, поседува висока класа на точност и документирана следливост до национални метролошки институти, па на тој начин истата припаѓа на ланецот на метролошка следливост, чијшто врв претставува Меѓународното биро за мери и тегови. И покрај тоа што постоечките акредитација и следливост на лабораторијата, во сферата на наведените електрични величини, се однесуваат исклучиво на синусни сигнални услови, постои можност, со нејзиниот примарен и секундарен еталон, ZERA COM3003 и CALMET C300, да се мерат, односно генерираат, хармониски – изобличени напони и струи, кои симулираат различни реални прилики во електроенергетскиот систем. Анализата на можностите за мерење електрична моќност/енергија, во несинусни услови, е примарно спроведена врз различни броила за активна и реактивна енергија, како најшироко распространети уреди за мерење на овие физички величини, кои учествуваат во регулираната наплата на електрична енергија.

Во рамки на првичните практични испитувања, спроведена е анализа на одзивот на три броила за активна енергија, базирани на различен принцип на мерење. За потребите на овој дел од истражувањето, применети се сигнали со случајно хармониско изобличување, кое не надминува 10 %, за трифазните напони, односно 40 %, за трифазните струи. Од добиените резултати е утврдено дека, трите броила: индукциско, електронско и дигитално; мерат со минимално дополнително отстапување во однос на нивните интринсични грешки, во случај кога фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза. Измерените грешки, при $\varphi_1=0^\circ$, се во рамки на декларираните граници, согласно класата на точност на инструментите. Кај електронското и дигиталното броило, отстапувањата се мали и кога постои фазна разлика помеѓу сигналите со основна фреквенција, но само доколку вишите хармоници се во фаза со фундаменталните напони и струи, при минувањето низ нулата на поединечните компоненти, во моментот на почеток на позитивната полупериода. Кога вишите хармоници се фазно поместени во однос на фундаменталните компоненти на сигналите, при $\varphi_1 \neq 0^\circ$, детектирани се грешки кои значително се разликуваат од интринсичните отстапувања на трите броила. Кај индукциското броило, ова е очекуван исход, имајќи предвид дека овие уреди, согласно теоретските забелешки, се вообичаено така конструктивно изведени, да до индикаторскиот механизам доспеваат само компонентите на сигналите со фреквенција од 50 Нг. Од друга страна, кај електронските и дигиталните броила, согласно теоретски – наведениот принцип на мерење, не се очекуваат големи разлики помеѓу резултатите добиени во синусен и несинусен режим на испитување. Добиените резултати се сосема

спротивни на очекувањата, особено кај дигиталното броило, кое поседува висока класа на точност. Измерените грешки, при $\cos\varphi_1=0,5$ L и $\cos\varphi_1=0,8$ C, достигнуваат вредности и до ±5 %, односно истите се неколкукратно поголеми од границите на грешка, наведени во постоечките стандарди и препораки, кои се валидни за хармониски – изобличени услови. Кај електронското броило, во дел од мерните точки, детектирани се отстапувања кои се во рамки на спецификациите, имајќи предвид дека истото има пониска класа на точност, а со тоа и пошироки граници на грешка. Она што е заедничко и за двата уреди е фактот што, во дадена мерна точка, измерените грешки речиси подеднакво отстапуваат во однос на покажувањата, регистрирани во синусен режим на тестирање, што наведува на заклучок дека тие се резултат на еден ист физички феномен.

За да се одреди причината за појава на грешки, неколкукратно поголеми од класата на точност на мерилата, и за да можат истите да се моделираат аналитички, за било какво изобличување во системот, спроведен е детален испитен протокол врз дигитално броило за активна енергија, кој вклучува испитни сигнали со виши хармоници од само еден ред. Во рамки на протоколот, реализирани се пет тест процедури, а во секоја од нив само еден параметар на вишите хармоници се менува, додека останатите се одржуваат на константна вредност. Тест процедурите со виши хармоници од 5^{ти} ред, во кои како променливи параметри се јавуваат нивните почетни фазни поместувања θ_{i5} и θ_{u5} , ги потврдуват заклучоците од првичните практични тестирања. Измерените грешки се мали кога фундаменталните напони и струи се меѓусебно во фаза, за било која вредност на почетните фазни агли на вишите хармоници. Минимални разлики помеѓу измерената и референтната моќност, се регистрирани и кога фазната разлика θ_{i5} - θ_{u5} е еднаква на 0° или 180°, независно од вредноста на φ_1 . Од друга страна, кога конкретните нагодувања на тест сигналите не се запазени, се регистрираат отстапувања, кои достигнуваат вредност и до ±16 %. Врз база на резултатите од спроведените мерења, утврдено е дека грешките на броилото се менуваат во однос на ϕ_1 според синусна функција, чијашто периода е пет пати помала од периодата на сигналите со основна фреквенција. Измерените отстапувања можат аналитички да се претстават и во однос на фазната разлика θ_{i5} - θ_{u5} , при што повторно се јавува синусна математичка функција на зависност, со периода еднаква на периодата на фундаменталните напони и струи. Од тест процедурите кои се однесуваат на променлив релативен удел на вишите хармоници од 5^{ти} ред, може да се заклучи дека, грешките линеарно зависат од вредноста на $i_{5,\%}$ и $u_{5,\%}$, односно од големината на соодветните ефективни вредности, I_5 и *U*₅. Процедурата со виши хармоници од различен ред, резултира со математички приказ, според кој периодата на поединечните криви на грешка во функција од φ_1 се менува обратно пропорционално на редот на вишите хармоници кои се јавуваат во испитните напони и струи. Врз база на резултатите од петте испитни процедури, изведен е аналитички израз, кој ги претставува апсолутните грешки во мерењето активна моќност, при тест сигнали со виши хармоници од само еден ред.

Имајќи предвид дека, во математичкиот модел за отстапувањата не е детектирана корелација помеѓу вишите хармоници и фундаменталните компоненти, различна од веќе споменатата врска која го вклучува фундаменталниот фазен агол φ_1 , предложен е аналитички израз за приказ на грешките, кој е валиден при случаен удел и случајно почетно фазно поместување на повеќе хармониски компоненти во сигналите. Предложениот модел е базиран на принципот на суперпозиција и понатаму се применува за приказ на мерниот алгоритам на тестираниот уред. Од добиените математички изрази може да се заклучи дека, еден инструмент за мерење активна моќност/енергија ги детектира вишите хармоници како компоненти кои ротираат со спротивна насока во однос на фундаменталните напони и струи. Валидацијата на изразот за приказ на измерената моќност е спроведена со примарниот еталон на Лабораторијата, ZERA COM3003, и тест сигнали кои вклучуваат повеќе виши хармоници со случаен удел и случајно почетно фазно поместување. Од добиените резултати, може да се заклучи дека, измерените грешки ја следат анвелопата на моделираните отстапувања, а постоењето дополнителни разлики се должи на можноста за воспоставување трифазен симетричен режим на испитување.

Сличен протокол е усвоен и за тестирање на уредите за мерење реактивна моќност/ енергија, во несинусни услови. Покрај тоа што грешките се разгледуваат во функција од промената на различни параметри на вишите хармоници, спроведена е и анализа која го зема во предвид пристапот за евалуација на референтната реактивна моќност. Во рамки на споредбата помеѓу измерената големина и референтната фундаментална реактивна моќност, детектиран е мерниот алгоритам на испитуваниот инструмент. Утврдено е дека тестираното броило ја мери реактивната моќност/енергија врз база на аналогно (фазно) поместување на напонските сигнали. Овој заклучок е извлечен врз база на интензитетот на измерените отстапувања, во рамки на петте испитни процедури, кои се помали од ±1 %, кога фундаменталниот фазен агол е помеѓу $\pm 45^{\circ}$ и $\pm 90^{\circ}$. За помал удел на реактивна моќност во системот, детектирани се грешки, кои изнесуваат максимални $\pm 3,1$ %, при $\varphi_1 = \pm 15^\circ$. Од тест процедурите со променлив релативен удел на напонските и струјните хармоници од 5^{ти} ред, може да се заклучи дека, за помали изобличувања, грешките поради неусогласеноста на мерниот алгоритам и пристапот за пресметка на референтната големина, се споредливи со интринсичните отстапувања на мерилото. Поради тоа, во некои мерни точки, двојната природа на отстапувањата, резултира со поништување на постоечките разлики помеѓу измерената и зададената моќност. Кога одзивот на броилото се споредува со зададената моќност, пресметана согласно дефиницијата на *Budeanu*, се регистрираат поголеми грешки, кои достигнуваат вредност од $\pm 6,5$ %, кога φ_1 е помеѓу $\pm 45^\circ$ и $\pm 90^\circ$, односно ± 15 %, за помал удел на реактивна моќност во системот. Кривите на грешка се менуваат според синусен закон, со променлива амплитуда, која линеарно зависи од уделот на вишите хармоници, и периода, која е обратно пропорционална на нивниот ред. Најголеми отстапувања се детектирани кога покажувањето на инструментот се споредува со референтна моќност, пресметана согласно пристапот на Fryze. Добиените криви на грешка, имаат специфичен облик во различни интервали на промена на фундаменталниот фазен агол. Кога φ_1 е помеѓу $\pm 60^{\circ}$ и $\pm 90^{\circ}$, грешките се релативно константни, па нивниот интензитет се менува помеѓу -7 % и -11 %, при тест сигнали со виши хармоници од 5^{ти} ред, кои имаат постојан удел, $u_{5.\%}=10$ % и $i_{5.\%}=40$ %, и променливо почетно фазно поместување, θ_{u5} , односно θ_{i5} . За помал фундаментален фазен агол, доаѓа до нагло зголемување на разликата помеѓу измерената и зададената моќност, која, при $\varphi_1 = \pm 15^\circ$, достигнува вредност и до -55 %. Големото отстапување, се должи на т.н. моќност на дисторзија, која фигурира во референтната големина, согласно усвоениот пристап за пресметка, а која не се детектира од страна на испитуваниот уред. Во рамки на анализата за детерминирање одзив кај инструментите за мерење реактивна моќност/енергија, во несинусни услови, вклучен е и примарниот еталон на Лабораторијата, ZERA COM3003. Овој инструмент е базиран на принципот на дигитално (временско) поместување на влезните напони или струи, па како таков е несоодветен за мерење фундаментална реактивна моќност. Последниот заклучок произлегува од спроведените симулации и реални мерења од кои се детерминирани отстапувања за различни испитни сигнали. Во рамки на наведената анализа, добиени се грешки кои

достигнуваат вредност и до ± 10 %. Конкретниот уред греши значително и во однос на референтната реактивна моќност, пресметана согласно пристапот на *Budeanu*, а измерените отстапувања изнесуваат максимални $\pm 12,5$ %. Истите се резултат на спротивната насока на ротација на фазорите на вишите хармоници, во однос на насоката на ротација на фазорите на фундаменталните напони и струи, како и на спротивните текови на дел од компонентите на хармониска моќност, гледано од перспектива на мерниот уред. Кога одзивот на еталонот се споредува со референтната моќност, пресметана согласно пристапот на *Fryze*, се добиваат криви на грешка со сличен облик како и при испитувањето на броилото, чијшто мерен алгоритам е базиран на аналогно поместување на мерените сигнали.

На крајот од анализата на одзивот на инструментите за мерење реактивна моќност/ енергија, направена е математичка симулација за степенот на максимално отстапување, кое би се јавило доколку се изврши споредба помеѓу покажувањата на два инструменти со различен принцип на мерење. Од наведената симулација може да се заклучи дека, максималната грешка поради неусогласеност на алгоритмите за мерење на тестираниот и референтниот инструмент, ќе достигне вредност од $\pm 12,5$ %, доколку се применат тест сигналите кои се опфатени во предложените испитни протоколи од докторскиот труд.

Постапката за испитување одзив на уредите за мерење електрична моќност и/или енергија, во несинусни услови, е комплетирана со претставување математички модел за евалуација на мерна неодреденост. Моделот е базиран на аналитичко изразување низа влијателни фактори, кои се препишуваат на мерењето: релативен удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници, ефективна вредност на применетите напони и струи и фазен агол помеѓу фундаменталните компоненти. Останатите големини, вклучително и активната или реактивната моќност, се добиваат пресметковно, а мерната неодреденост придружена кон нив се изразува со помош на преносни функции, изведени од основните равенки за приказ и анализа на електричните сигнали во несинусни услови.

Со користење тест сигнали со случајно хармониско изобличување, применети врз примарниот еталон на Лабораторијата, извршена е валидација на математичкиот модел за евалуација на мерната неодреденост, во доменот на мерење активна моќност. Од спроведените мерења и споредбата помеѓу резултатите добиени согласно наведениот пристап и математички модел базиран на директно мерење на конкретната величина, валиден за синусни услови, можат да се извлечат низа заклучоци. Кога $\varphi_1=0^\circ$, вкупната мерна неодреденост, пресметана согласно предложениот модел, е речиси двојно поголема од вредноста добиена со примена на поедноставениот пристап. Ова се должи на земањето во предвид на поединечните фактори кои влијаат врз мерењето релативен удел и почетно фазно поместување на вишите хармоници. При фундаментален фазен агол од $\pm 60^{\circ}$, оваа разлика е речиси четири пати поголема, а истата се должи примарно на влијанието на неодреденоста, придружена кон мерењето на φ_1 , односно кон пресметката на фундаменталниот фактор на моќност, соѕф1. Врз база на заклучоците за доминантните влијателни фактори, придружени кон директното мерење поединечни виши хармоници, спроведена е симулација на промената на мерната неодреденост, придружена кон мерењето активна моќност, при промена на вредноста на поединечните параметри на сигналите. Од добиените резултати може да се заклучи дека, варијациите на почетните фазни поместувања на вишите хармоници незначително влијаат врз промената на вкупната мерна неодреденост. Од друга страна, вредностите на θ_{uh} и θ_{ih} ја одредуваат точката, определена со φ_1 , во која се детектира најголема неодреденост. Промената на релативниот удел на напонските и струјните виши хармоници линеарно придонесува за промена на неодреденоста,

придружена кон мерењето активна моќност. Линеарно зголемување на $U_{C,P\%}$ се детектира и при пораст на редот на вишите хармоници, h, присутни во испитните сигнали. Овој заклучок е валиден во мерните точки кои одговараат на поголем удел на активна моќност во системот. Кога φ_1 е поголем од ±30°, промената на h значително влијае врз мерната неодреденост, придружена кон фазниот агол помеѓу вишите хармоници на напоните и струите, па регистрирани се примери на поголема вкупна неодреденост, при присуство на хармоници од понизок ред, во рамките на една иста мерна точка.

На самиот крај од ова изложување, треба да се напомене дека се очекува, заклучоците од спроведената анализа, да придонесат во процесот на воспоставување идни рутински калибрациски и верификациски протоколи, за испитување инструменти за мерење електрична моќност и/или енергија, во несинусни услови. Анализата на причините за отстапување и интензитетот на грешки кај мерилата за активна енергија, при промена на различни фундаментални и хармониски параметри на сигналите, би требало да послужи како основа за понатамошно толкување на мерни резултати, добиени во рамки на реалната примена на конкретните уреди. Снимениот одзив во однос на усвоената дефиниција за референтната големина, би требало да придонесе за правилен избор на мерило за реактивна моќност/енергија, согласно постоечките мерни алгоритми, за потребите на некоја конкретна апликација. Предложениот математички модел за евалуација на мерната неодреденост, може да послужи за воспоставување ланец на метролошка следливост во доменот на калибрација на мерила за електрична моќност и/или енергија со несинусни наизменични сигнали. Овој модел останува отворен за понатамошно надополнување со други влијателни фактори кои го афектираат мерењето на конкретните електрични величини. Моделот може да биде надограден во иднина, со имплементација на пософистицирана математичка алатка, како на пример Монте Карло методот или пристапот базиран на Бајесова статистика, со цел пореалистичен приказ на перформансите на мерната инструментација и детектирање на временски – зависните флуктуации на мерните сигнали.

ДОДАТОК А – ТЕСТ ПРОТОКОЛ ЗА АНАЛИЗА НА ОДЗИВОТ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ АКТИВНА МОЌНОСТ/ ЕНЕРГИЈА



ДОДАТОК Б – ТЕСТ ПРОТОКОЛ ЗА АНАЛИЗА НА ОДЗИВОТ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ ЗА МЕРЕЊЕ РЕАКТИВНА МОЌНОСТ/ ЕНЕРГИЈА



139

ДОДАТОК В – ЕВАЛУАЦИЈА НА КОМБИНИРАНАТА МЕРНА НЕОДРЕДЕНОСТ КАЈ ДИРЕКТНО МЕРЕНИТЕ ГОЛЕМИНИ

Комбинирана мерна неодреденост, придружена кон директното мерење релативен удел на виш напонски и струен хармоник од ред h, $u_{h,\%}$ и $i_{h,\%}$



Комбинирана мерна неодреденост, придружена кон директното мерење ефективна вредност на трифазните напони и струи, U и I



Комбинирана мерна неодреденост, придружена кон директното мерење фундаментален фазен агол, φ_1 , и почетни фазни поместувања на вишите хармоници, θ_{uh} и θ_{ih}



ДОДАТОК Г – ЕВАЛУАЦИЈА НА МЕРНАТА НЕОДРЕДЕНОСТ ПРИДРУЖЕНА КОН МЕРЕЊЕТО АКТИВНА МОЌНОСТ



ЛИСТА НА ПУБЛИКАЦИИ

- [1] **Demerdziev, K.**, Cundeva-Blajer, M., Dimchev, V., Srbinovska, M., Kokolanski, Z. "Defining an uncertainty budget in electrical power and energy reference standards calibration", In 18th International Conference on Smart Technologies – IEEE EUROCON 2019, Novi Sad, Serbia, 1-4 July, 2019, pp. 1-6, IEEE.
- [2] **Demerdžiev, K**., Dimčev, V. "Uncertainty budget evaluation principle in high and low resolution digital multimeters calibration", *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies, "Ss. Cyril and Methodius" University in Skopje, Skopje, North Macedonia, Vol. 4, No. 1-2, 2019, pp. 5-13.
- [3] Demerdžiev, K., Dimčev, V., Čundeva-Blajer, M., Kokolanski, Ž., Srbinovska, M. "Active electricity meters error analysis in case of harmonically distorted voltages and currents", *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies, "Ss. Cyril and Methodius" University in Skopje, Skopje, North Macedonia, Vol. 6, No.1, 2021, pp.29-36.
- [4] Demerdziev, K., Dimchev, V. "Analysis of Errors in Active Power and Energy Measurements Under Random Harmonic Distortion Conditions", *Measurement Science Review*, Institute of Measurement Science of the Slovak Academy of Sciences, Karlova Ves, Slovakia, Vol. 21, No. 6, 2021, pp. 168-179. (IF=1,319)
- [5] **Demerdziev, K**., Dimchev, V. "Error Evaluation in Reactive Power and Energy Measurements Adopting Different Power Theories", In *Conference Proceedings of XV International conference ETAI 2021*, Online Conference, 23-24 September 2021, pp. 205-211.
- [6] Demerdziev, K., Dimchev, V. "Active Power Measurement Uncertainty Budget Modelling in Case of Harmonically Distorted Voltages and Currents", In *Proceedings* of *IMEKO TC11 & TC24 Joint Hybrid Conference*, Dubrovnik, Croatia, 17-19 October 2022, pp. 99-104.
- [7] Demerdziev, K., Dimchev, V. "Reactive Power and Energy Instrument's Performance in Non-Sinusoidal Conditions Regarding Different Power Theories", *Measurement Science Review*, Institute of Measurement Science of the Slovak Academy of Sciences, Karlova Ves, Slovakia, Vol. 23, No. 1, 2023, pp. 19-31. (IF=1,985)
- [8] **Demerdziev, K.**, Dimchev, V., "Active Power Measurement Uncertainty Modelling and Propagation Analysis in Case of Harmonically Distorted Signals", In *ACTA IMEKO*, Journal of the International Measurement Confederation, Budapest, Hungary, Vol.12, No.3, article 15, 2023, pp. 1-10.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Grady, M. "Understanding power system harmonics", *University of Texas*, Austin, Texas, USA, 2006.
- [2] Santoso, S., McGranaghan, M. F., Dugan, R. C., & Beaty, H. W. "Electrical power systems quality 3rd edition", *McGraw-Hill Education*, USA, 2012.
- [3] Zobaa, A. F., Bansal, R., & Manana, M. "Power quality: Monitoring, analysis and enhancement", *InTech Open*, Rijeka, Croatia, 2011.
- [4] Rangelov, Y. "Overview of Harmonics in Electrical Power Systems", Proceedings of International Scientific Symposium – Electrical Power Engineering 2014, Varna, Bulgaria, 11-13 September 2014, pp 63-70.
- [5] Kusko, A. "Power quality in electrical systems", *McGraw-Hill Education*, USA, 2007.
- [6] Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. "Power quality in power systems and electrical machines", *Academic press-Elsevier*, USA, 2008.
- [7] Baggini, A. "Handbook of power quality", John Wiley & Sons, UK, 2008.
- [8] Balci, M. E., & Hocaoglu, M. H. "Comparison of power definitions for reactive power compensation in nonsinusoidal conditions", In 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, NY, USA, September 2004, pp. 519-524.
- [9] Svensson, S. "Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions The significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities", Doctoral Thesis, *Chalmers University of Technology*, Goteborg Sweden, 1999.
- [10] Trujillo, A. E. G., "Harmonics influence on power and energy measurements", *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, Universidad Tecnica De Manabi, Vol. 3, No.1 2019, pp. 32-41.
- [11] Morva, G., Volokhin, V., Diahovchenko, I., & Čonka, Z. "Analysis of the impact of nonlinear distortion in voltage and current curves on the errors of electric energy metering devices", 2017 IEEE first Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 29 May-02 June 2017, pp. 528-533.
- [12] Raza, S. S., Ahmad, M., & Perveiz, M. S. "Performance of energy meters under harmonic generating environment", *Science International (Lahore)*, Publications International, Lahore, Pakistan, Vol.26, No.5, 2014, pp. 2063-2069.
- [13] Budeanu, C. I. "Puissances réactives et fictives", *Institut National Romain pour l'Étude de l'Aménagement et de l'Utilisation d'Énergie*, Bucharest, Romania, 1927.
- [14] Fryze, S. "Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current" *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 13, 1931, pp. 193-203.
- [15] Willems, J. L. "Budeanu's reactive power and related concepts revisited", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, USA, Vol. 60, No. 4, 2010, pp. 1182-1186.
- [16] Czarnecki, L. S. "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned", *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 3, 1987, pp. 834-837.

- [17] Czarnecki, L. S. "Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents". *Electrical Engineering*, Springer Verlag, Germany, Vol. 80, No. 6, 1997, pp. 359-367.
- [18] Kusters, N. L., & Moore, W. J. M. "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, No.5, 1980, pp. 1845-1854.
- [19] EU Directive on Measuring Instruments (MID) 2004/22/EC, *European Parliament and Council*, Brussels, Belgium, 2004.
- [20] EU Directive on Measuring Instruments (MID) 2014/32/EU, *European Parliament and Council*, Brussels, Belgium, 2014.
- [21] Ferrero, A., Faifer, M., & Salicone, S. "On testing the electronic revenue energy meters" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 58, No. 9, 2009, pp. 3042-3049.
- [22] Olencki, A., & Mróz, P. "Testing of energy meters under three-phase determined and random nonsinusoidal conditions", *Metrology and Measurement Systems*, Polish Academy of Sciences Committee on Metrology and Scientific Instrumentation, Poland, Vol. 21, No. 2, 2014, pp. 217-232.
- [23] Ferrero, A., Faifer, M., & Salicone, S. "A testing procedure for the new, electronic revenue energy meters", In 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, British Columbia, Canada, 12-15 May 2008, pp. 83-88.
- [24] Ferrero, A., & Muscas, C. "On the selection of the" best" test waveform for calibrating electrical instruments under nonsinusoidal conditions" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, 2000, Vol. 49, No. 2, pp. 382-387.
- [25] EN 50470-1:2006+A1:2018 Electricity metering equipment (a.c.) Part 1: General requirements, tests and test conditions Metering equipment (class indexes A, B and C), *European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)*, Brussels, Belgium, 2018.
- [26] EN 50470-2:2006+A1:2018 Electricity metering equipment (a.c.) Part 2: Particular requirements - Electromechanical meters for active energy (class indexes A and B), *European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)*, Brussels, Belgium, 2018.
- [27] EN 50470-3:2006+A1:2018 Electricity metering equipment (a.c.) Part 3: Particular requirements - Static meters for active energy (class indexes A, B and C), *European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)*, Brussels, Belgium, 2018.
- [28] OIML R 46-2 & 1:2012 Active electrical energy meters. Part 1: Metrological and technical requirements and Part 2: Metrological controls and performance tests, *International Organization of Legal Metrology (OIML)*, Paris, France, 2012.
- [29] Wang, R., & Yuan, J. "Study on electrical energy meter for energy measuring under harmonics condition", In 2016 International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016), Shenzhen, China, 19-21 August, 2016, pp. 311-316.
- [30] Masri, S., M., Mamat, M. N., & Yahya, M. Y. "An experimental study of the effect of current THD to kWh meter's energy measurement", *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Tejass Publisheers, India, Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 98-102.
- [31] Masri, S., Khairunaz, M. D., & Mamat, M. N. "Study of electronic energy meter performance under harmonics current condition", In Proceedings of 10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications, Springer, Singapore, 2019, pp. 449-456.
- [32] Diahovchenko, I., Volokhin, V., Kurochkina, V., Špes, M., & Kosterec, M. "Effect of harmonic distortion on electric energy meters of different metrological principles", *Frontiers in Energy*, Springer, Germany, Vol. 13, No. 2, 2019, pp. 377-385.
- [33] Bartolomei, L., Cavaliere, D., Mignotti, A., Perreto, L., Tinarelli, R. "Testing of electrical energy meters in off-nominal frequency conditions", 2019 IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Aachen, Germany, 25-27 September 2019, pp. 1-6
- [34] Bartolomei, L., Cavaliere, D., Mingotti, A., Peretto, L., & Tinarelli, R. "Testing of electrical energy meters subject to realistic distorted voltages and currents" *Energies*, MDPI, Switzerland, Vol.13, No. 8, pp. 2023.
- [35] Georgakopoulos, D., & Wright, P. S. "Calibration of energy and power meters under non-sinusoidal conditions", *Proceedings-Science, Measurement and Technology*, IEEE, 2006, Vol.153, No. 6. pp 241-247.
- [36] Georgakopoulos, D. "Selecting calibration waveforms for power analyzers and meters under nonsinusoidal conditions", In 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Wollongong, Australia, 28 September – 1 October, 2008, pp. 1-5.
- [37] Gallo, D., Landi, C., Pasquino, N., & Polese, N. "A new methodological approach to quality assurance of energy meters under nonsinusoidal conditions", *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, 2007, Vol.56, No.5, pp. 1694-1702.
- [38] Caiceres, R., Correa, R., Ferreyra, P., & Cordero, E. "Study of active electric energy meters behavior of induction and electronic types", In 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, Venezuela, 15-18 August 2006, pp. 1-6.
- [39] Ortiz, A., Lehtonen, M., Mañana Canteli, M., Renedo Estébanez, C. J., & Eguíluz Morán, L. I. "Energy meter behaviour under non-sinusoidal conditions", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality, 2004, Vol.1 No.2, pp. 402-407
- [40] Ortiz, A., Lehtonen, M., Mañana, M., Renedo, C. J., Muranen, S., & Eguíluz, L. I. "Evaluation of energy meters' accuracy based on a power quality test platform", *Electric Power components and systems*, Taylor & Francis, UK, 2007, Vol.35, No.2, pp. 221-237.
- [41] Cetina, Q., Roscoe, R. A. J., & Wright, P. S. "Challenges for smart electricity meters due to dynamic power quality conditions of the grid: A review", In 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Liverpool, UK, 20-22 September 2017, pp. 1-6.

- [42] Cetina, Q. R., Seferi, Y., Blair, S. M., & Wright, P. S. "Energy metering integrated circuit behavior beyond standards requirements", *Energies*, MDPI, Switzerland, 2021, Vol.14, No. 2, pp. 390.
- [43] Berrisford, A. J. "The harmonic impact project—IEEE-1459 power definitions trialed in revenue meters." In 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, Texas, USA, 14-17 May 2018, pp. 1-5.
- [44] Edwards, S., Bobick, D., Weinzierl, S. "Impact of harmonic current on energy meter calibration." In *IEEE 2011 EnergyTech*, Cleveland, Ohio, USA, 25-26 May 2001, pp. 1-6.
- [45] Shklyarskiy, Y. E., A. N. Skamyin, and O. S. Vasilkov. "Measurement of power consumption parameters in the presence of high harmonics." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, IAEME Publication Vol.10, No.3, 2019, pp.1204-1209.
- [46] Vasconcellos, M. T., Luna, J. H. M. Luna, Mateus, J. C. Portugal, S. A. "Harmonic Distortion as an Influence Quantity on Reactive Static Electrical Energy Meters." *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, Vol. 575, 2015, pp. 1-11
- [47] IEC 62053-21:2020 Electricity metering equipment Particular requirements Part 21: Static meters for AC active energy (classes 0,5, 1 and 2), *International Electrotechnical Committee* (IEC), Geneva, Switzerland, 2020.
- [48] IEC 62053-22:2020 Electricity metering equipment Particular requirements Part 22: Static meters for AC active energy (classes 0,1S, 0,2S and 0,5S), *International Electrotechnical Committee* (IEC), Geneva, Switzerland, 2020.
- [49] IEC 62053-23:2020 Electricity metering equipment Particular requirements Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3), *International Electrotechnical Committee* (IEC), Geneva, Switzerland, 2020.
- [50] IEC 62053-24:2020 Electricity metering equipment Particular requirements Part 24: Static meters for fundamental component reactive energy (classes 0,5S, 1S, 1, 2 and 3), *International Electrotechnical Committee* (IEC), Geneva, Switzerland, 2020.
- [51] IEEE 1459:2010 Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, New York, USA, 2010.
- [52] Barbaro, P.V., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio. S. "Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems." In Proceedings of XVIII IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, 17-22 September, 2006, Vol.3 pp.1802-1807
- [53] Cataliotti, A., Cosentino, V., Lipari, A., Nuccio, S. "Characterization of multifunction meters based on integrated devices n the presence of harmonic distortion." In Proceeding of 16th IMEKO TC4 International Symposium: Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements, Florence, Italy, 22-24 September, 2008, pp. 305-310.
- [54] Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S. "Static meters for the reactive energy in the presence of harmonics: An experimental metrological characterization." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 58, No. 8, 2009, pp. 2574-2579.

- [55] Cataliotti, A., Cosentino, V., Lipari, A., Nuccio, S. "On the calibration of reactive energy meters under non sinusoidal conditions." In Proceedings of *XIX IMECO World Congress: Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, Portugal, 06-11 September 2009, pp. 719-723.
- [56] Cataliotti, A., Cosentino, V., Lipari, A., Nuccio, S. "On the methodologies for the calibration of static electricity meters in the presence of harmonic distortion." In Proceedings of 17th Symposium IMEKO TC4, 3rd Symposium IMEKO TC19 and 15th IWADC Workshop Instrumentation for ICT Ers, Kosice, Slovakia, 8-10 September 2010, pp. 167-172.
- [57] Berrisford, A. J. "New technology and power definitions make accurate revenue metering possible in the presence of harmonic distortion." In Proceedings of 2009 IEEE *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, Montreal, Quebec, Canada, 22-23 October 2009, pp. 1-8.
- [58] Berrisford, A. J. "Smart Meters should be smarter." In Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California, USA, 22-26 July 2012, pp. 1-6.
- [59] Berrisford, A. J. "A Smarter Meter: IEEE-1459 power definitions in an off-the-shelf Smart Meter." In Proceedings of 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Pisa, Italy, 11-14 May 2015 pp. 830-835.
- [60] Arseneau, R., Filipski, P. "A calibration system for evaluating the performance of harmonic power analyzers." *IEEE transactions on power delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol.10, No.3, 1995, pp. 1177-1182.
- [61] Cataliotti, A., Cosentino, V., Crotti, G., Giordano, D., Modarres, M., Di Cara, D., Tinè, G., Gallo, D., Landi C., Luiso M. "Metrological performances of voltage and current instrument transformers in harmonics measurements." In 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, Texas, USA, 14-17 May 2018, pp. 1-6.
- [62] Djokic, B., Bosnjakovic, P., Begovic, M. "New method for reactive power and energy measurement." *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 41, No. 2, 1992, pp. 280-285.
- [63] Arranz-Gimon, A., Zorita-Lamadrid, A., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O. "A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems." *Energies*, MDPI, Vol.14, No.20, 2021, pp. 6467.
- [64] Kuwałek, P., Wiczyński, G. "Problem of total harmonic distortion measurement performed by smart energy meters." *Measurement Science Review*, De Gruyter Poland, Vol. 22, No. 1, 2022, pp. 1-10.
- [65] EA-4/02:2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, *European Accreditation Laboratory Committee*, Paris, France 2022.
- [66] Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM, *JCGM 100 with member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML)*, 2008.
- [67] EN 50160:2010+A2:2019, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, *European Committee for Electrotechnical Standardization* (*CENELEC*), Brussels, Belgium, 2018.

- [68] C300 Three phase power calibrator and power engineering apparatus testing User's manual and extended specifications, *CALMET Ltd.* Poland, 2012.
- [69] IEEE Working Group on Non-sinusoidal Situations. "Effects on meter performance and definitions of power; practical definitions for power in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 79–101.
- [70] Králiková, E., Čičáková. O. "Distortion power measurements in education." In *Proceedings of the 9th international conference MEASUREMENT 2013*, Smolenice, Slovakia, 27-30 May 2013, pp. 75-78.
- [71] Gregory, B. A. "An introduction to electrical instrumentation and measurement systems: a guide to the use, selection, and limitations of electrical instruments and measurement systems Second edition". *Macmillan*, Hampshire and London, UK, 1981.
- [72] Purkait, P., Biswas, B., Das, S., Koley, C. "Electrical and electronics measurements and instrumentation". *McGraw-Hill Education (India)*, New Delhi, India 2013.
- [73] Tumanski, S. "Principles of electrical measurement". CRC press, Taylor and Francis Group, New York, USA, 2006.
- [74] Гавровски, Ц. "Основи на мерна техника второ издание", Факултет за Електротехника и Информациски Технологии, Скопје, Македонија, 2008.
- [75] Bucci, G., Fiorucci, E., Ciancetta, F., Gallo, D., Landi, C., Luiso, M. "Embedded power and energy measurement system based on an analog multiplier." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., USA, Vol. 62, No. 8, 2013, pp.2248-2257.
- [76] Daigle, P. "All-Electronic power and energy meters." *Analogue Dialogue*, Analog Devices Inc. Vol. 33, No. 2, 1999, pp. 1-3.
- [77] Markow, J. "Microcontroller-based energy metering using the AD7755." *Analog Dialogue*, Analog Devices Inc., Vol. 33, No. 1, 1999, pp. 1-2.
- [78] Hribik, J., Fuchs, P., Hruškovic, M., Michálek, R., Lojko, B. "Digital power and energy measurement." In *Proceedings of the 14th International Czech-Slovak Scientific Conference ,, Radioelektronika 2004*, Bratislava, Slovakia, 2004, pp. 60-63.
- [79] Fuchs, P., Hribik, J., Hruškovic, M., Lojko, B., Michálek, R. "Digital Power and Energy Measurement." In *Proceedings of the 13th International Symposium on Measurements for Research and Industry Applications and 9th European Workshop on ADC Modelling and Testing*, Vol. 2, pp. 493-497.
- [80] Rathore, T.S. "Digital Measurement Techniques Second Edition", *Alpha Science International Ltd*, Oxford, UK, 2003.
- [81] MKC EN ISO/IEC 17025:2018 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, *International Standardization Organization* (ISO), Geneva, Switzerland, 2017.
- [82] <u>https://www.bipm.org/en/</u> (последен пристап на 11.02.2023)
- [83] COM3003 Three phase comparator Operation Manual, ZERA GmbH, Germany, 2012.
- [84] PC Software for C300 Calibrator Control, Calpro 300 Basic User's, *CALMET Ltd*. Poland, 2012.
- [85] ZMD400AT/CT E650 Series 4 User manual, Landys+Gyr, Switzerland, 2017.

- [86] ZMD300AT/CT E650 Series 3 User manual, Landys+Gyr, Switzerland, 2012.
- [87] MT173 Three-phase static electricity multi tariff meter with maximum demand indicator and load-profile Technical description, Iskraemeco, Slovenia, 2010.
- [88] Sundstrom, T., Schlicker, S., "Trigonometry", *Grand Valley State University*, Michigan, USA, 2022.
- [89] OIML V 2-200 International Vocabulary of Metrology Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), Fourth Edition, *International Organization of Legal Metrology (OIML)*, Paris, France, 2021.
- [90] Османовиќ, П., Станковиќ, К., Вујисиќ, М. "Мерна несигурност" Академска Мисао, Београд, Р.Србија, 2009.
- [91] Kirkup, L., Frenkel, R.B. "An Introduction to Uncertainty in Measurement" *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 2010.
- [92] Nicholas, V., White, D. R. "Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration" *John Wiley & Sons*, UK, 2001.
- [93] Olencki, A. "The repeatability as a quality accuracy test standard of the electrical energy meter", *Electrical Review*, Vol.87, No.11, pp 154-158.
- [94] Velychko, O., Karpenko, S. "Remote calibration of precision working standards of electric power" In Proceedings of 21st IMEKO TC4 International Symposium and 19th International Workshop on ADC Modelling and Testing Understanding the World through Electrical and Electronic Measurement, Budapest, Hungary, 07-09 September 2016, pp. 272-277.
- [95] Velychko, O., Karpenko, S., Karpenko, I. "Evaluation the Uncertainty Influence Depends on Harmonic Voltage Distortion for Precision Power Measurements" In Proceedings of 23rd IMEKO TC4 International Symposium Electrical & Electronic Measurements Promote Industry 4.0, Xi'an, China, 17-20 September 2019, pp. 48-51.
- [96] Velychko, O., Karpenko, S., Kazakova, E., Gubler, G., Gelovani, M., Abasbekova, E., Cayci, H., Sluciak, J., Cundeva-Blajer, M., Lei, W., Ariuntungalag, J., Bartolomew, J., Alorobaish, A.M., Halawa M. "Final Report on COOMET key comparison of power (COOMET.EM-K5)", *Metrologia*, Vol. 56, No.1a, 2019, pp. 01010
- [97] Arsov, L., Cundeva-Blajer, M. "Development of Metrological Infrastructure in R. Macedonia", In Proceedings of 2nd IMEKO TC 11 International Symposium METROLOGICAL INFRASTRUCTURE, Cavtat, Croatia, 15–17 June 2011, pp.105-110.
- [98] Arsov, L., Cundeva-Blajer, M. "Establishing Metrology Infrastructure and Traceability of Electrical Power and Energy in R. Macedonia" In *XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*, Busan, Republic of Korea, 9–14 September 2012.
- [99] Arsov, L., Cundeva-Blajer, M. "Establishing a Metrological Infrastructure and Traceability of Electrical Power and Energy in the R. Macedonia", ACTA IMEKO, International Measurement Confederation, Budapest, Hungary, Vol.2, No.2, 2013, pp. 86-90.
- [100] Cundeva-Blajer, M., Iliev, B. "Review and Contribution to the Best Measurement and Calibration Capabilities in the Field of Electrical Energy and Power", In Proceedings of International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2016, Ohrid, R. Macedonia, 28-30 June 2016.

- [101] Cundeva-Blajer, M. "Analysis of the State of the Art with Contribution to the Metrology Infrastructure through Accredited and Traceable Measurements of Electrical Power and Energy", In Proceedings of the *International Symposium* "*Energetics*" 2016, Ohrid, R. Macedonia, 6-8 October 2016, Book 1 pp. 99-108.
- [102] Илиев, Б. "Придонес кон развојот на метролошката инфраструктура во Република Македонија – национален еталон за моќност и енергија" Магистерски труд, Универзитет "Св. Кирил и Методиј" во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје, Р.Македонија, 2016.
- [103] Arsov, L., Cundeva-Blajer, M. "Traceability Insurance in Calibrations and Verifications in the Field of Electrical Power and Energy" In Proceedings of the 7th Conference for Large Electrical Systems MAKOCIGRE 2011, Ohrid, P. Macedonia, 02-04 October 2011, pp. B5-080R.
- [104] Iliev, B., Cundeva-Blajer, M. "Development of Metrology Infrastructure for Electrical Energy and Power in R. Macedonia" In Proceedings of the 9th Conference for Large Electrical Systems MAKOCIGRE 2015, Ohrid, P. Macedonia, 27-29 September 2015, pp. B5-018R.
- [105] Demerdziev, K., Cundeva Blajer, M., Dimcev, V., Srbinovska, M., Kokolanski, Z. "Improvement of the FEIT Laboratory of Electrical Measurements Best CMC Through Internationally Traceable Calibrations and Inter-Laboratory Comparisons", In XIV International conference ETAI, Struga, R. Macedonia, 20-22 September 2018.
- [106] Evaluation of measurement data Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101:2008 with member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML), 2008.
- [107] Salicone, S. "Measurement Uncertainty An Approach via the Mathematical Theory of Evidence", *Springer*, NY, USA, 2007.