



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Автоматика

Катедра „Електроизмервателна техника“

маг. инж. Красимир Симеонов Гълъбов

**ВИРТУАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА
КАЛИБРИРАНЕ И ПРОВЕРКА НА
АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електроизмервателна техника

**Научни ръководители: проф. д-р Пламен Маринов Цветков
доц. д-р Иван Николов Коджабашев**

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електроизмервателна техника“ към Факултет Автоматика на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 30.11.2018 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 23.04.2019 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-02 / 09.01.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Георги Сашов Милушев – председател
2. Доц. д-р инж. Иван Николов Коджабашев – научен секретар
3. Проф. д.т.н. инж. Чавдар Иванов Дамянов
4. Проф. д-р инж. Звездица Петрова Ненова
5. Доц. д-р инж. Пламен Иванов Никовски

Рецензенти:

1. Доц. д-р инж. Георги Сашов Милушев
2. Проф. д.т.н. инж. Чавдар Иванов Дамянов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Автоматика на ТУ-София, блок № 2, кабинет №2350.

Дисертантът е докторант към катедра „Електроизмервателна техника“ на факултет Автоматика при Технически университет - София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора в катедра „Електроизмервателна техника“, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Красимир Гълъбов

Заглавие: „Виртуални технологии за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Развитието на съвременните технологии през последните години доведе от една страна до увеличаване на електропотреблението, а от друга страна до повишаване на изискванията към качеството на електрозахранването.

Измервателните средства, които са натоварени със задачата да оценят качеството на електрическата енергия, се наричат анализатори на електрическа енергия (АЕЕ). Както всички измервателни средства, така и АЕЕ подлежат на контрол за доказване на актуалното им метрологично състояние.

Дисертационният труд е посветен на теоретически и практически въпроси, свързани с метрологичните дейности калибриране и проверка на анализаторите на електрическа енергия, реализирани чрез съвременни виртуални технологии.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Изследване и разработване на подходи, модели и алгоритми за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия, базирани на виртуални технологии.

За реализиране на тази цел в дисертационния труд се решават следните основни задачи:

- Задача 1.** Изследване и анализ на възможностите за използване на периодичен правоъгълен сигнал за целите на калибрирането и проверката на анализатори на електрическа енергия.
- Задача 2.** Разработване на математически модели за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия.
- Задача 3.** Синтез на алгоритми и виртуални инструменти за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия.
- Задача 4.** Експериментални изследвания на разработените виртуални инструменти за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия.

За решаване на посочените задачи използваните методи са: преглед на актуалното състояние и тенденции, предложен е на нов подход, предложени са математически модели и алгоритми, експериментиране на конкретни съвременни решения за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия чрез виртуални технологии и инструменти.

Научна новост

В дисертационният труд са предложени: нов научен подход използване на периодичен правоъгълен сигнал, предложени са математически модели и алгоритми, виртуална система и виртуални инструменти за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия.

Практическа приложимост

Предложени са математически модели, разработени са алгоритми, виртуална система и виртуални инструменти за калибриране и проверка на АЕЕ.

Проведените изследвания и разработки в дисертационния труд могат да бъдат внедрени в практиката на метрологичната дейност при калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия.

Апробация

Основните постановки и резултати от дисертационния труд са докладвани на:

- XXV Международен научен симпозиум „Метрология и метрологично осигуряване 2015”, Созопол 07-11. Септември 2015, България
- International Conference Automatics'2016, FA, June 03-05, 2016, Sozopol, Bulgaria
- Scientific and Technical Conference with International Participation “Devices and Methods of Measurement, Quality Control and Diagnostics in Industry and Transport” October 20, 2016, Omsk, Russia
- 28th International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance 2018", September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria
- 3rd All-Russian. Scientific and Technical Conference with International Participation “Devices and Methods of Measurement, Quality Control and Diagnostics in Industry and Transport” October 18 – 19, 2018, Omsk, Russia.
- Списание Електротехника и електроника, 2018, Vol. 53. Issue 11-12/2018 ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA E+E, Vol. 53. Issue 11-12/2018. pp. 285-288, ISSN 0861-4717
- Списание Електротехника и електроника, 2019, Vol. 54 Issue 1-2/2019 ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA E+E, Vol. 54. Issue 1-2/2019. pp. 22-25, ISSN 0861-4717

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани общо в 7 броя статии и доклади, от които 1 доклад е самостоятелен и 6 броя са в съавторство. 2 броя статии са в списание, 2 броя доклади са в реферирани трудове на международни конференции в Русия и 2 броя доклади са в реферирани трудове на международни конференции в България.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 182 страници, като включва увод, една глава с преглед на актуалното състояние на проблема, пет глави за решаване на поставените задачи в дисертационния труд, списък на приносите за актуалност, списък на авторските публикации по дисертацията и използваната литература. Цитирани са общо 114 литературни източници, като 23 са на латиница и 35 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 91 фигури и 10 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

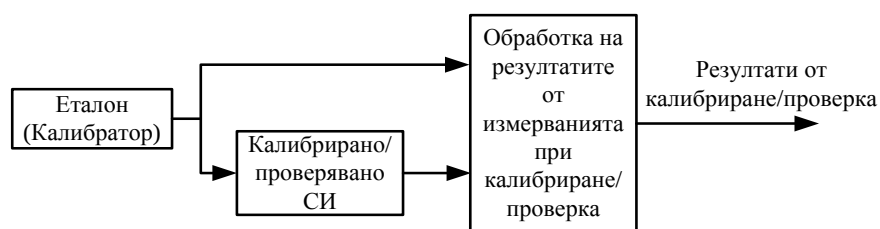
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОСНОВНИ ПОСТАНОВКИ И ТЕНДЕНЦИИ ПРИ КАЛИБРИРАНЕ И ПРОВЕРКА НА АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

1.1. Калибриране и проверка на средствата за измерване

Представят се общи постановки на единството на измерванията и осигуряването на проследимост на измерванията [31, 39, 17, 21, 34] чрез метрологичните дейности калибриране [31, 53] и проверка [31, 3] на средствата за измерване (СИ).

В метрологичната практика за калибриране и проверка на СИ [20, 13] се реализират преобладаващо следните два метода: метод на еталонния сигнал (Фиг. 1.1) и метод на еталонното СИ. Процедурите, свързани с измерванията при калибрирането и проверката на СИ съвпадат. Разликата е в обработката на резултатите от измерванията и представянето на крайните резултати.



Фиг. 1.1. Метод на еталонния сигнал

Калибрирането на СИ е метрологична процедура, при която се определя действителната стойност на измерваната величина и нейната неопределеност в точката на калибриране. Оценките за действителната стойност и неопределеността на измерваната величина се получават чрез 7 последователни операции, описани в т. 1.1.3.1. Резултатът от калибрирането е количествен. Резултатите от калибрирането се представят в Свидетелство за калибриране. Калибрирането се извършва от акредитирани (лицензирани) лаборатории [31, 11, 47, 1, 30, 12].

Проверката на СИ е метрологична процедура, при която се определя максималната стойност на грешката и се сравнява с допустимата стойност на грешката на проверяваното СИ. Оценките на стойността за максималната абсолютната грешка за измерваната величина от всички точки на проверка във всички обхвати на проверяваното СИ се получават чрез 4 последователни операции, описани в т. 1.1.3.2. Резултатът от проверката е качествен, представя се чрез маркирането и/или издаването на свидетелство (сертификат) за проверка със заключение – годен/негоден. По своята същност проверката на СИ е оценяване на съответствието на проверяваното средство за измерване с нормите в неговата техническата спецификация. Проверката на СИ се извършва в оправомощени лаборатории за проверка [20, 25, 16].

1.2. Специфични особености на калибрирането и проверката на анализатори на електрическа енергия

Основните специфични особености на АЕЕ се определят от функционалното им предназначение - специализирани СИ за измерване и контрол на количествени и качествени показатели (параметри) на електрическата енергия.

Основните измервани величини са: напрежение, ток, мощност (активна, реактивна, пълна) и честота. Основните показатели на електрическа енергия са: хармоници (от 1-ви до 50-ти), коефициент на нелинейни изкривявания, фактор на мощността.

Специфични особености на АЕЕ са следните:

1. АЕЕ имат възможност за едновременно изпълнение на няколко задачи, като за определен период може да се прави запис на величини и параметри и същевременно с това в реално време да се наблюдава изменението им.

2. АЕЕ като специализирани СИ подлежат на калибриране и проверка. За калибрирането и проверката на АЕЕ е целесъобразно да се използва метода на еталонния сигнал, познат като метод на пряко измерване.

За калибрирането на АЕЕ по отделните величини: напрежение, ток, честота, мощност, и други са необходими еталонни калибратори за съответната величина или многофункционални калибратори, предназначен за калибриране на АЕЕ.

За калибрирането на АЕЕ по някои специфични величини и параметри, например хармоници на напрежението и тока, коефициент на нелинейни изкривявания на напрежението и тока и фактор на мощността е необходимо да се генерират два или повече от два синусоидални (хармонични) сигнала. Преобладаващите калибратори не притежават тази възможност (а многофункционалните калибратори са много скъпи), което определя целесъобразността да се изследват и анализират възможностите за калибриране на АЕЕ чрез сложни периодични сигнали. Такива сигнали основния хармоник съдържат и компоненти с честоти кратни на честотата на основния хармоник, например сигнали с правоъгълна, триъгълна, трапецоидална и друга форма на вълната, различна от синусоида.

Посочват се основните технически и метрологични характеристики [8] и нормативни документи [38] за АЕЕ. Те се разделят на три класа [38] в зависимост от предназначението, метрологичните и функционалните характеристики: Клас А, Клас S и Клас В.

1.3. Калибриране на анализатори на електрическа енергия в Р. България

Към настоящият момент на изисквания отговаря само лабораторията по „Електроенергийни измервания“ към Главна дирекция „Национален център по метрология“ (ГД „НЦМ“) при Български институт по метрология (БИМ).

1.4. Виртуалните технологии и инструменти за целите на калибрирането и проверката на средства за измерване за електрически величини

Развитието на компютърните, комуникационните и информационните технологии през последните десетилетия доведоха до съществени технологични промени в съвременните измервателните средства и системи, като цяло и в частност за целите на метрологичната дейност. В областта на измервателните технологии, качествен скок представлява развитието на концепцията за създаване на „Виртуалните инструменти“ (ВИ) и последвалото развитие на виртуалните измервателни лаборатории [32, 33, 29, 36].

В литературата съществува голямо разнообразие от дефиниции на термина „Виртуален инструмент“. Фирмата National Instruments дава две трактовки [57] на този термин:

1. ВИ е комбинация от софтуерни и хардуерни елементи, които под управлението на персонален компютър „добиват“ функционалността на традиционен измервателен уред.

2. ВИ е софтуерен модул създаден в програмната среда LabVIEW [58], състоящ се от потребителски интерфейс (лицев панел) и програмен код (блокова диаграма).

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) [57], е програмна среда от графичен „G“ програмен език, който намира широко приложение в инженерните науки и технологии. Предимство на средата е големият набор от библиотеки за събиране, анализ, представяне (визуализиране) и съхранение на данни (резултати от измервания) [57, 33].

Терминът „виртуален“ най-често се добавя към конкретна технология, процес, процедура или техническа реализация. В настоящия труд този термин се свързва с реализиране на измервателни процедури и се използва в контекста на наименованието „виртуални измервателни технологии“. В настоящия труд наименованието **„виртуални технологии“**, а в частност и **„виртуални технологии за калибриране и/или проверка“** ще се използва в следния контекст: **„свкупност от способности и средства за реализиране на операции и процедури за измерване, калибриране и проверка, чрез използване на компютърни, комуникационни и информационни технологии на базата на виртуални инструменти“**.

Виртуалният инструмент може да се разглежда като система. Наборът от хардуерни модули с различни функции, управлявани от персонален компютър, може да се представи

като виртуална среда с множество функции за контрол, измерване и управление [57, 105, 106, 63].

Актуалността на дейностите калибриране и проверка на АЕЕ, наличието у нас на единствена акредитирана лаборатория в НЦМ при БИМ, а също и наличието на необходимите предпоставки, обуславят възможността и необходимостта от разработване, експериментиране и изграждане на:

- виртуални инструменти за целите на калибрирането на АЕЕ.
- виртуални инструменти за проверка на АЕЕ по хармоници и коефициент на нелинейни изкривявания.

ГЛАВА 2. ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА КАЛИБРИРАНЕ НА АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ, ЧРЕЗ ПЕРИОДИЧЕН ПРАВОЪГЪЛЕН СИГНАЛ

2.1 Представяне на периодичен сигнал чрез тригонометричен ред на Фурие

Тригонометрична форма на реда на Фурие на сложния периодичен сигнал $x(t)$ има вида:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + B_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (2.1)$$

където,

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.2a)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (2.2б)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega_1 t dt \quad (2.2в)$$

2.2. Възможности и особености на използването на периодичен правоъгълен двуполярен сигнал при калибриране на анализатори на електрическа енергия

Периодичният правоъгълен сигнал е един от най-често срещаните образцови периодични сигнали. Той може да бъде генериран много по-лесно в сравнение с хармоничния (синусоидален или косинусоидален) сигнал, като неговите параметри могат да бъдат зададени с много по-голяма точност и стабилност в сравнение с хармоничния.

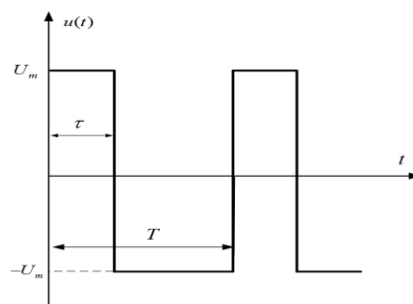
На Фиг.2.1 е представена формата на периодичен правоъгълен двуполярен импулсен сигнал (напрежение) $u(t)$. Той се описва с изказа:

$$u(t) = \begin{cases} +U_m & t \in 0, \tau \\ -U_m & t \in \tau, T \end{cases} \quad (2.4)$$

където

- U_m е амплитудата,
- τ е продължителността; а
- T е периода на импулсния сигнал.

Важен параметър на периодичния правоъгълен сигнал е неговият коефициент на запълване μ , който зависи от продължителността и периода на импулса и се



Фиг.2.1. Времева диаграма на периодичния двуполярен правоъгълен сигнал

определя от израза $\mu = \frac{\tau}{T}$. Като се приложи разлагане на периодичния двуполярен правоъгълен сигнал (2.4) в ред на Фурие [41, 54], се получава тригонометричното описание [40]

$$u(t) = 2U_m(\mu - 0,5) + \frac{4U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\mu)}{n} \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \quad (2.5)$$

Така напрежението, което се генерира от калибратора и което се подава на входа на калибрирания анализатор, съдържа сумата на основния и безкрайна поредица от хармоници с честоти кратни на честотата на основния хармоник (обикновено тя е $f_1 = f = \frac{1}{T} = 50\text{Hz}$), като техните амплитуди са както следва:

- амплитуда на основния хармоник [A4, A5]

$$U_{1m} = \frac{4U_m}{\pi} \sin(\pi\mu) = \sqrt{2}U_1 \quad (2.6)$$

като $U_1 = U_{1nom}$ е ефективната стойност на основния хармоник, който обикновено е номиналното фазно мрежово напрежение и

- амплитуда на n -ти хармоник със стойност [A4, A5]

$$U_{nm} = \left| \frac{4U_m}{n\pi} \sin(n\pi\mu) \right| \quad (2.7)$$

От (2.6) и (2.7) се вижда, че амплитудите на всички хармоници, в това число и на основния (първия) хармоник, зависят само от два параметъра на правоъгълния сигнал: амплитуда U_m и коефициент на запълване μ . Това дава възможност чрез предварителен подбор на стойности за тези два параметъра да се задават стойности на хармониците, за които да се калибрира анализатора.

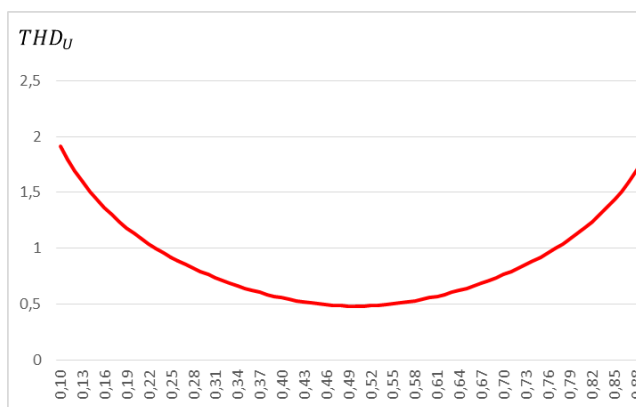
В случая може с основание да се посочи, че подходът с използване на периодичен правоъгълен сигнал е подходящ за калибриране по хармоник на анализатори на електрическа енергия, като в зависимост от номера на хармоника трябва да се избере най-подходящата комбинация от коефициент на запълване и амплитуда, които да бъдат съобразени с възможностите на използвания калибратор. Тази най-подходяща комбинация трябва да се определи на база на анализ на грешката на задаване на стойността на хармоника.

Периодичният правоъгълен импулсен сигнал, описан с израз (2.5), има коефициент на нелинейни изкривявания, определен в [40]

$$THD_U = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu)\pi^2}{2\sin^2(\pi\mu)}} - 1, \quad \text{за } 0 < \mu < 1, \quad (2.8)$$

От израз (2.8) се вижда, че единственият параметър, който влияе на коефициента на нелинейни изкривявания на периодичния правоъгълен сигнал, е неговият коефициент на запълване μ , т.е. не зависи от големината на отделните хармоници. Това дава възможност чрез предварителен подбор на стойност за коефициента на запълване μ да се задава конкретни стойности на коефициент на нелинейни изкривявания, за които да се калибрира анализатора. Графиката на тази зависимост е представена на Фиг.2.2

В случая може с основание да се посочи, че подходът с използване на правоъгълен сигнал е подходящ за калибриране по коефициент на нелинейни изкривявания на анализатори на електрическа енергия, като подходящата стойност на коефициента на запълване трябва да се определи на база на анализ на грешката на задаване на стойността на коефициент на нелинейни изкривявания.



Фиг.2.2. Графично представяне на $THD_U(\mu)$

2.3. Анализ на грешката при калибриране по хармоници чрез самостоятелни хармонични сигнали и чрез периодичен правоъгълен сигнал

При калибриране на анализатора по хармоник на напрежението чрез генериране самостоятелни хармонични сигнали от калибратора се задава номинална ефективна стойност на напрежението на основния (първия) хармоник, като обикновено то е $U_{1nom} = 230V$ и ефективна стойност на съответния хармоник U_n (самостоятелен хармоник), за която се калибрира анализатора. Подходът на задаване на самостоятелни хармоници може да се приложи само ако калибратора разполага с възможност за генериране на периодичен сигнал, който да е сума от два или повече хармонични сигнала, като единия от които е напрежението на основния хармоник с мрежова честота $f = 50Hz$, а другия/ите на съответния/ите хармоник/ци. Ако калибратора не притежава такава възможност се предлага да се използва подхода на калибриране чрез използване на периодичен правоъгълен двуполярен сигнал.

Относителната грешка на хармоника на калибратора при задаване на самостоятелен хармоник е равна на грешката, с която се задава конкретното хармонично напрежение.

При подхода на задаване на периодичен правоъгълен сигнал, всеки хармоник има ефективна стойност, представена чрез (2.5), която е функция на величините амплитуда U_m и коефициент на запълване μ .

Относителната грешка на зададената от калибратора стойност на n -тия хармоник се получава [A4, A5]

$$\delta_{U_{n,et}} = \frac{\Delta U_n}{U_n} = \frac{\Delta U_m}{U_m} + n\pi\mu \cdot \text{ctg}(n\pi\mu) \frac{\Delta\mu}{\mu} = \delta_{U_m} + n\pi\mu \cdot \text{ctg}(n\pi\mu) \delta_\mu = \delta_{U_m} + a_{U_n,\mu} \delta_\mu \quad (2.9)$$

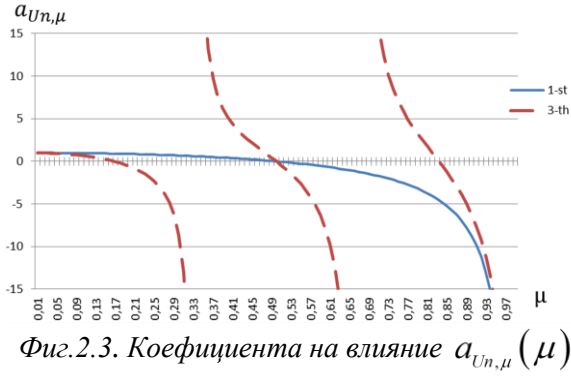
където

δ_{U_m} е относителната грешка на амплитудата,

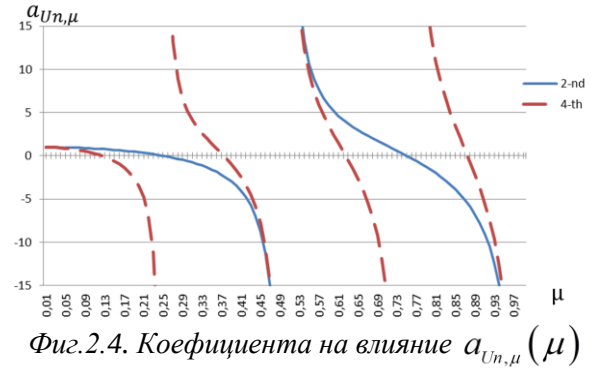
δ_μ е относителната грешка на коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал, а

$a_{U_n,\mu}$ е коефициента на влияние на δ_μ

От проведеното изследване на функцията, коефициента на влияние $a_{U_n,\mu} = n\pi\mu \cdot \text{ctg}(n\pi\mu)$, за първи и трети (Фиг.2.3) и за втори и четвърти (Фиг.2.4) хармоници се вижда се, че за всеки един конкретен хармоник, величината a_μ се нулира при определени стойности на μ . В тези точки относителната грешка (2.9) на зададената стойност на съответния хармоник не зависи от стойността на относителната грешка на коефициента на запълване δ_μ на периодичния правоъгълен сигнал [49].



Фиг.2.3. Коефициента на влияние $a_{U_{1,\mu}}(\mu)$ на първи и трети хармоник



Фиг.2.4. Коефициента на влияние $a_{U_{2,\mu}}(\mu)$ на втори и четвърти хармоник

2.4. Анализ на грешката при калибриране по коефициент на нелинейни изкривявания чрез генериране самостоятелни хармонични сигнали и чрез периодичен правоъгълен сигнал

Зависимостта, по която се изчислява коефициент на нелинейни изкривявания, например за величината електрическо напрежение при наличие на безкраен ред на хармоници [49], е следната

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (2.10)$$

При калибриране на анализатора по коефициент на нелинейни изкривявания на напрежението чрез генериране самостоятелни хармонични сигнали чрез калибратора се задават стойности на основния хармоник и групата хармоници, за които се калибрира анализатора.

Определя се относителната грешка на коефициент на нелинейни изкривявания на калибратора [A5, A6]

$$\delta_{THDU,et} = \frac{1}{THD_U^2} \sum_{n=2}^{\infty} THD_{Un}^2 \delta_{THDU_n} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{THD_{Un}^2}{THD_U^2} \delta_{THDU_n} = \sum_{n=2}^{\infty} a_{THDU_n}^2 \delta_{THDU_n} \quad (2.13)$$

където

- δ_{THDU_n} е относителната грешка на съответния хармоник, а
- a_{THDU_n} е коефициента на влияние на относителната грешка на съответния хармоник.

Относителната грешка на задаване на общия коефициент на нелинейни изкривявания чрез подхода на самостоятелни хармонични сигнали е равна на сумата на относителните грешки δ_{THDU_n} на задаване на коефициента на нелинейни изкривявания за всеки един хармоник умножена с нейния съответен коефициент на влияние a_{THDU_n} .

За анализ на относителната грешка на задаване на общия коефициент на нелинейни изкривявания при подхода на периодичен правоъгълен сигнал се използва израза (2.8), като след диференцирането му по коефициента на запълване μ се получава израза за чувствителността [A5, A6]

$$S_{THDU} = \frac{dTHD_U}{d\mu} = \frac{\frac{1}{2} \pi^2 (1-\mu) \frac{1}{\sin^2(\pi\mu)} - \frac{1}{2} \pi^2 \mu \frac{1}{\sin^2(\pi\mu)} - \pi^3 (1-\mu) \mu \frac{\cos(\pi\mu)}{\sin^3(\pi\mu)}}{2 \sqrt{-1 + \frac{1}{2} \pi^2 (1-\mu) \mu \frac{1}{\sin^2(\pi\mu)}}} \quad (2.14)$$

Относителната грешката на задаване на коефициента на нелинейни изкривявания от калибратора [A5, A6]

$$\delta_{THDU,et} = \frac{dTHDU}{THDU} = \frac{S_{THDu}}{THDU} d\mu = \frac{S_{THDu} \mu}{THDU} \frac{d\mu}{\mu} = \frac{S_{THDu} \mu}{THDU} \delta_{\mu} = a_{THDU,\mu} \delta_{\mu} \quad (2.15)$$

където

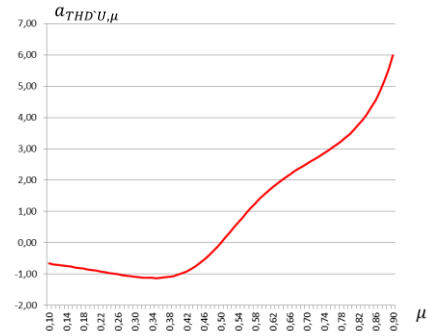
- δ_{μ} е относителната грешка на коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал, а
- $a_{THDU,\mu}$ е коефициента на влияние на относителната грешка на коефициента на запълване μ .

Функцията на коефициента на влияние

$$a_{THDU,\mu} = \frac{S_{THDu} \mu}{THDU}$$

е представена на Фиг.2.5 и

показва, че в областта $0 < \mu < 0,5$ относителната грешка има по-малки стойности в сравнение с областта $0,5 < \mu < 1$. Освен това относителната грешка (2.14) на задаване на коефициент на нелинейни изкривявания чрез подхода на периодичния правоъгълен сигнал е функция само на коефициента на запълване μ .



Фиг.2.5: Графично представяне на $a_{THDU,\mu}(\mu)$

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ ПРИ КАЛИБРИРАНЕ И ПРОВЕРКА НА АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

3.1. Обща постановка на математическите модели

При калибриране на АЕЕ измерваната величина се задава с помощта на еталонен калибратор, а действителната стойност на измерваната величина се изчислява на базата на измерената стойност от калибрирания анализатор. Калибрирането се извършва по метода на прякото сравнение.

3.1.1. Обща постановка при калибриране на анализатори на електрическа енергия

Математическият модел за действителната стойност на величината X , за която се калибрира анализатора, е [47]:

$$\begin{aligned} X_{act} &= X_{cal} - \delta X_{et} + \delta X_{res,cal} = \\ &= X_{cal} + \delta X_{res,cal} - \delta X_{s,et} - \delta X_{dr,et} - \delta X_{t,et} - \delta X_{l,et} - \delta X_{z,et} - \delta X_{res,et} \end{aligned} \quad (3.1)$$

където

- X_{cal} е измерената стойност на величината, получена от калибрирания анализатор, изчислена като средна стойност на n измервания $X_{cal,i}$, където $n \geq 10$
- $\delta X_{res,cal}$ - отклонение на измерената стойност, дължащо се от разделителната способност на калибрирания анализатор
- δX_{et} - поправка на зададената от калибратора стойност на величината, която може да включва:
 - $\delta X_{s,et}$ - отклонение на зададената стойност, отчетена при последното калибриране на еталона и записано в неговото свидетелство за калибриране
 - $\delta X_{dr,et}$ - дрейф на генерираната от калибратора стойност
 - $\delta X_{t,et}$ - отклонение на стойността от изменение на околната температура;
 - $\delta X_{l,et}$ - отклонение на стойността от промени на захранващото напрежение;
 - $\delta X_{z,et}$ - отклонение на стойността от енергиен обмен
 - $\delta X_{res,et}$ - отклонение от разделителната способност на еталона.

При определянето на δX_{et} трябва да се отчетат само онези негови съставки, които имат преобладаваща стойност, а останалите съставки се пренебрегват.

Отклонение на зададената стойност на величината в точката на калибриране X_{et} от еталона $\delta X_{s.et}$ може да се определи чрез относителната грешка на калибратора δX_{et} , определена в неговата ТД като

$$\delta X_{s.et} = \delta X_{et} X_{et} \quad (3.2)$$

Математическият модел за действителната стойност на величината за която се калибрира анализатора се свежда:

$$X_{act} = X_{cal} - \delta X_{et} + \delta X_{res.cal} = X_{cal} - \delta X_{s.et} - \delta X_{dr.et} + \delta X_{res.cal} \quad (3.3)$$

3.1.2 Обща постановка при проверка на анализатори на електрическа енергия

Математическият модел за определяне на максималната стойност на грешката в проверяваната точка на анализатора, е:

$$\Delta = |X_{cal} - X_{et}|, \quad (3.4)$$

където: X_{cal} е отчетената стойност от анализатора в проверяваната точка, X_{et} - зададената еталонна стойност от калибратора в проверяваната точка

Проверката на АЕЕ се извършва в не по-малко от три зададени точки (минимална, средна и максимална стойност). От получените стойности за грешката Δ_i се определя грешката с максимална стойност $\Delta_{i,max}$. Тази грешка се сравнява с максимално допустимата грешка Δ_{mpe} , посочена в техническата документация на АЕЕ.

При $\Delta_{i,max} < \Delta_{mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за годен.

При $\Delta_{i,max} > \Delta_{mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за не годен.

3.2.1 Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по напрежение

Математическият модел за действителната стойност на величината напрежение, за която се калибрира анализатора е:

$$U_{act} = U_{cal} - \delta U_{s.et} - \delta U_{dr.et} + \delta U_{res.cal}, \quad (3.5)$$

където:

- U_{cal} - измерената стойност на напрежението от калибрирания анализатор, изчислена като средна стойност на n независими измервания, където $n \geq 10$.
- $\delta U_{s.et}$ - отклонението на зададената стойност на напрежението, отчетена при последното калибриране на калибратора и записано в неговото свидетелство за калибриране.
- $\delta U_{dr.et}$ - дрейф на калибратора по напрежение. Определя се на базата на статистически данни за дрейфа в интервалите между две последователни калибрирания на калибратора, като правоъгълно разпределена величина (равномерен закон) със стойност нула и граници, съответстващи на нормираните в спецификацията на калибратора стойности.
- $\delta U_{res.cal}$ - отклонението от разделителна способност на калибрирания анализатор по напрежение. Определя се като правоъгълно разпределена величина със стойност нула и граници, равни на половината от най-малката значеща цифра или

$$\delta U_{res.cal} = \frac{a}{2\sqrt{3}}, \text{ където } a \text{ е най-младшия разряд на уреда.}$$

Стандартната неопределеност на всяка една от компонентите (входни величини) в математическия модел (3.5), съгласно [47] се определя както следва:

- $u(U_{cal})$ - стандартна неопределеност на измерената стойност на напрежението

$$u(U_{cal}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (U_i - U_{cal})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.6)$$

където U_i е текущата стойност на измерените i стойности на напрежението, а U_{cal} е средната стойност на резултатите от измерване на напрежението.

- $u(\delta U_{s.et})$ - стандартна неопределеност на отклонението на зададената стойност на напрежението, която се определя като $\frac{1}{2}$ от разширената неопределеност на поправката на калибратора в точката на калибриране, посочена в неговото свидетелство за калибриране.
- $u(\delta U_{dr.et})$ - стандартна неопределеност на дрейфа на калибратора по напрежение, която се определят чрез граничните стойности на изменението на дрейфа на калибратора по напрежение или израз $u(\delta U_{dr.et}) = b.a$, където $b = 0,6$ за равномерен закон на разпределение при доверителна вероятност $P = 1$ и a е границата на изменение на дрейфа на напрежението.
- $u(\delta U_{res.cal})$ - стандартна неопределеност от разделителна способност на калибрирания анализатор по напрежение, която се определя чрез израз $u(\delta U_{res.cal}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$, където a е стойността на най-младшия разряд на калибрирания анализатор.

Комбинираната стандартна неопределеност $u_c(U)$ на изходната оценка на напрежението се определя чрез компонентите на стандартните неопределености на входните величини $u_i(U) = c_i \cdot u(U_i)$, където $i = 1, 2, 3, \dots, N$ е пореден номер на входната величина, а c_i са коефициенти на чувствителност на неопределеността на входните величини. За математическия модел (3.5) коефициентите на чувствителност $c_i = 1$. Тогава комбинираната стандартна неопределеност $u_c(U)$ на изходната оценка на напрежението се изчислява по формулата [47]:

$$u_c(U) = \sqrt{u^2(U_{cal}) + u^2(\delta U_{s.et}) + u^2(\delta U_{dr.et}) + u^2(\delta U_{res.cal})} \quad (3.7)$$

Разширена неопределеност на измереното напрежение [47] е

$$U = k \cdot u_c(U), \quad (3.8)$$

където k е множител на покритие. При нормален закон на разпределение и доверителна вероятност 0.95% се приема $k = 2$.

В представените по-долу математически модели при калибриране на АЕЕ по разглежданите други измервани величини, всички входни величини имат същият физически смисъл и оценяването на неопределеността се дава от същите формули, както са описани по-горе в т. 3.2.1

3.2.2 Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по ток

Математическият модел за действителната стойност на величината, за която се калибрира анализатора, е:

$$I_{act} = I_{cal} - \delta I_{s.et} - \delta I_{dr.et} + \delta I_{res.cal} \quad (3.10)$$

3.2.3. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по активна мощност

Математическият модел за действителната стойност на активната мощност, за която се калибрира анализатора, е:

$$P_{act} = P_{cal} - \delta P_{s.et} - \delta P_{dr.et} + \delta P_{res.cal} \quad (3.11)$$

Отклонението на зададената стойност от калибратора на активната мощност [56, 55] се определя чрез:

$$\delta P_{s.et} = \frac{\delta_{Pet}}{100} \cdot P_{et};$$

$$\text{където: } \delta_{Pet} = \sqrt{\delta_{Uet}^2 + \delta_{Iet}^2 + \delta_{(\cos\varphi)et}^2 + 0,0095^2} \text{ и } \delta_{(\cos\varphi)et} = \left(1 - \frac{\cos(\varphi + d\varphi)}{\cos\varphi}\right),$$

- δ_{Uet} - относителната грешка на зададената стойност на напрежението
- δ_{Iet} - относителната грешка на зададената стойност на тока
- $\delta_{(\cos\varphi)et}$ - относителната грешка на зададената стойност на $\cos(\varphi)$

3.2.4. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по реактивна мощност

Математическият модел за действителната стойност на реактивната мощност, за която се калибрира анализатора, е:

$$Q_{act} = Q_{cal} - \delta Q_{s.et} - \delta Q_{dr.et} + \delta Q_{res.cal} \quad (3.12)$$

Отклонението на зададената стойност от калибратора на реактивната мощност [56, 55] се определя чрез:

$$\delta Q_{s.et} = \frac{\delta_{Qet}}{100} \cdot Q_{et};$$

$$\text{където: } \delta_{Qet} = \sqrt{\delta_{Uet}^2 + \delta_{Iet}^2 + \delta_{(\cos\varphi^*)et}^2 + 0,0095^2} \text{ и } \delta_{(\cos\varphi^*)et} = \left(1 - \frac{\sin(\varphi + d\varphi)}{\sin\varphi}\right),$$

- δ_{Uet} - относителната грешка на зададената стойност на напрежението
- δ_{Iet} - относителната грешка на зададената стойност на тока
- $\delta_{(\cos\varphi^*)et}$ - относителната грешка на зададената стойност на $\sin(\varphi)$

3.2.5. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по пълна мощност

Математическият модел за действителната стойност на пълната мощност, за която се калибрира анализатора, е:

$$S_{act} = S_{cal} - \delta S_{s.et} - \delta S_{dr.et} + \delta S_{res.cal} \quad (3.13)$$

Отклонението на зададената стойност от калибратора на пълната мощност [56, 55] се определя чрез:

$$\delta S_{s.et} = \frac{\delta_{Set}}{100} \cdot S_{et} \quad \delta_{Set} = \sqrt{\delta_{Uet}^2 + \delta_{Iet}^2 + 0,0095^2},$$

където:

- δ_{Uet} - относителната грешка на зададената стойност на напрежението
- δ_{Iet} - относителната грешка на зададената стойност на тока

3.2.6. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по $\cos\varphi$

Математическият модел за действителната стойност на $\cos\varphi$, за която се калибрира анализатора, е [56, 55]:

$$\cos\varphi_{act} = \cos\varphi_{cal} - \delta \cos\varphi_{s.et} - \delta \cos\varphi_{dr.et} + \delta \cos\varphi_{res.cal} \quad (3.14)$$

Отклонението на зададената стойност на $\cos\varphi$ [56, 55] от калибратора се определя чрез

$$\delta \cos\varphi_{s.et} = \delta_{\cos\varphi} \cdot \cos\varphi$$

$$\text{където } \delta_{\cos\varphi} = \left(1 - \frac{\cos(\varphi + d\varphi)}{\cos\varphi}\right)$$

3.2.7. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по честота

Математическият модел за действителната стойност на честотата, за която се калибрира анализатора, е:

$$f_{act} = f_{cal} - \delta f_{s.et} - \delta f_{dr.et} + \delta f_{res.cal} \quad (3.15)$$

3.2.8. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по хармоник на напрежението

При калибриране на анализатора по хармоник чрез калибратора се задава номиналната ефективна стойност на първия (основния) хармоник и ефективна стойност на съответния хармоник, за която се калибрира анализатора. Този подход може да се приложи, ако калибратора разполага с възможност да генерира периодичен сигнал, който да е сума от два или повече хармонични сигнала, като единия от които е синусоидалното напрежение на основния (първи) хармоник с честота $f = 50\text{Hz}$. Ако калибратора не притежава такава възможност се предлага да се използва подхода на периодичния правоъгълен сигнал.

Математическият модел за действителната стойност на величината – напрежение на n -я хармоник, за която се калибрира анализатора, е:

$$U_{n,act} = U_{n,cal} - \delta U_{n,s.et} - \delta U_{n,dr.et} + \delta U_{n,res.cal} \quad (3.16)$$

За определяне на отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на n -тия хармоник на напрежението $\delta U_{n,s.et}$ при използване на подхода на задаване на периодично правоъгълно напрежение се получава [A4, A5]:

$$\delta U_{n,s.et} = \delta_{U_{n,et}} U_n = \left\{ \delta_{U_m} + \left[n\pi\mu \cdot \text{ctg}(n\pi\mu) \right] \delta_{\mu} \right\} \left[\frac{2\sqrt{2}U_m}{n\pi} \sin(n\pi\mu) \right] \quad (3.17)$$

3.2.9. Математически модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по хармоник на тока

Математическият модел за действителната стойност на величината – ток на хармоник, за която се калибрира анализатора, е:

$$I_{n,act} = I_{n,cal} - \delta I_{n,s.et} - \delta I_{n,dr.et} + \delta I_{n,res.cal} \quad (3.18)$$

Калибрирането се извършва по аналогичен начин както е предложено в т.3.2.8, с тази особеност, че се прилага за ток.

3.2.10. Математичен модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по коефициент на нелинейни изкривявания на напрежението

Коефициентът на нелинейни изкривявания на напрежението се означава с THD_U и се изчислява по:

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (3.19)$$

Математическият модел за действителната стойност на величината, за която се калибрира анализатора, е:

$$THD_{U,act} = THD_{U,cal} - \delta THD_{U,s.et} - \delta THD_{U,dr.et} + \delta THD_{U,res.cal} \quad (3.20)$$

За определяне на отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на коефициента на нелинейни изкривявания на напрежението $\delta THD_{U,s.et}$ при използване на подхода на задаване на периодично правоъгълно напрежение се получава [A5, A6]:

$$\delta THD_{U,s.et} = \delta_{THDu,et} THD_U = a_\mu \delta_\mu THD_U = THD_U \frac{S_{THDu} \mu}{THD_U} \delta_\mu = S_{THDu} \mu \delta_\mu \quad (3.21)$$

3.2.11. Математичен модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по коефициент на нелинейни изкривявания на тока

Коефициент на нелинейни изкривявания на тока се означава с THD_I и се изчислява по:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.22)$$

Математичният модел за действителната стойност на коефициента на нелинейни изкривявания на тока, за която се калибрира анализатора, има вида:

$$THD_{In,act} = THD_{In,cal} - \delta THD_{In,s.et} - \delta THD_{In,dr.et} + \delta THD_{In,res.cal} \quad (3.23)$$

където отделните компоненти за хармоничните токове в израза са аналогични на компонентите на хармоничните напрежения в (3.19).

Калибрирането се извършва по аналогичен начин както е предложено в т.3.2.10, с тази особеност, че се прилага за ток.

3.2.12. Математичен модел при калибриране на анализатор на електрическа енергия по фактор на мощността

Математическият модел за действителната стойност на фактор на мощността, за която се калибрира анализатора, е:

$$PF_{act} = PF_{cal} - \delta PF_{s.et} - \delta PF_{dr.et} + \delta PF_{res.cal} = PF_{cal} - \delta_{PFet} . PF_{et} - \delta PF_{dr.et} + \delta PF_{res.cal} \quad (3.24)$$

За определяне на отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на фактора на мощността $\delta PF_{s.et}$ при използване на подхода на задаване на периодични правоъгълни импулсни напрежение и ток се получава [A7]:

$$\begin{aligned} \delta PF_{s.et} &= PF \delta_{PF} = PF \left(a_{\varphi 1} \delta_{\varphi 1} + a_{THDU} \delta_{THDU} + a_{THDI} \delta_{THDI} \right) = \\ &= \left(\cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1+THD_U^2} \sqrt{1+THD_I^2}} \right) * \\ &* \left(-\varphi_1 \tan \varphi_1 \delta_{\varphi 1} + 2THD_U^2 (1+THD_U^2) \delta_{THDU} + 2THD_I^2 (1+THD_I^2) \delta_{THDI} \right) \end{aligned} \quad (3.37)$$

3.3. Математически модели за изчисляване на грешката при проверка на анализатор на електрическа енергия

Когато отсъства калибратор за задаване комбинация от хармонични сигнали и в спецификацията на АЕЕ има зададени стойности на грешките на величините хармоници по напрежение и ток и коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение и ток е целесъобразно да се извърши проверка на тези величини.

3.3.1. Математически модел за изчисляване на грешката при проверка на анализатор на електрическа енергия по хармоник на напрежение

При проверката на АЕЕ по хармоници, целта е получаване на максималната стойност на грешката на амплитудата на хармоника в проверяваните точки. От прецизен калибратор се задава еталонната стойност на напрежението на първия (основния) хармоник U_1 и коефициент на запълване на правоъгълния сигнал μ в определена точка за проверка, която се отчита от проверявания анализатор.

Математическият модел за максималната стойност на грешката в проверяваната точка на анализатора е:

$$\Delta_{Un,i} = |U_{n,cal} - U_{n,t}| \quad (3.38)$$

където: $U_{n,cal}$ е отчетената стойност от анализатора в проверяваната точка, $U_{n,t}$ - зададената еталонна стойност от калибратора в проверяваната точка.

Проверката на АЕЕ се извършва в не по-малко от три зададени точки (минимална, средна и максимална стойност). От получените стойности за грешката $\Delta_{Un,i}$ се определя грешката с максимална стойност $\Delta_{Un,i,max}$. Тази грешка се сравнява с максимално допустимата грешка $\Delta_{Un,i,mpe}$, посочена в техническата документация на АЕЕ.

При $\Delta_{Un,i,max} < \Delta_{Un,i,mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за годен.

При $\Delta_{Un,i,max} > \Delta_{Un,i,mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за не годен.

3.3.2. Математически модел за изчисляване на грешката при проверка на анализатор на електрическа енергия по коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение

При проверката на АЕЕ по коефициент на хармонично изкривяване (THD) по напрежение, целта е получаване на максималната стойност на грешката на THD в проверяваните точки. От прецизен калибратор се задава еталонната стойност на напрежението на първия (основния) хармоник U_1 и коефициент на запълване на правоъгълния сигнал μ . За μ се задават минимум три точки. От проверявания анализатор се отчитат стойностите на $THD_{AU,i}$ в съответните точки.

Математическият модел за максималната стойност на грешката за THD по напрежение в проверяваната точка на анализатора $THD_{AU,i}$ е:

$$\Delta_{THD,U,i} = |THD_{cal,U} - THD_t|, \quad (3.39)$$

където: $THD_{cal,U}$ е отчетената стойност от анализатора на THD в проверяваната точка, THD_t - теоретичната стойност на THD по (2.8), зададена от калибратора чрез амплитудата на правоъгълния импулс и стойността на μ в проверяваната точка.

От получените стойности за грешката в проверяваните точки $\Delta_{THD,U,i}$ се определя грешката с максимална стойност $\Delta_{THD,U,i,max}$. Тази грешка се сравнява с максимално допустимата грешка $\Delta_{THD,U,mpe}$, посочена в техническата документация на АЕЕ.

При $\Delta_{THD,U,i,max} < \Delta_{THD,U,mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за годен.

При $\Delta_{THD,U,i,max} > \Delta_{THD,U,mpe}$ - проверявания анализатор се обявява за не годен.

ГЛАВА 4. АЛГОРИТМИ ЗА КАЛИБРИРАНЕ И ПРОВЕРКА НА АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Алгоритмите за калибриране на АЕЕ представят последователността на операциите по управление на еталонния калибратор и калибрирания анализатор, генериране на стойности за тока и/или напрежението от калибратора, провеждане на многократни измервания в точката на калибриране, записване на резултати от анализатора, събиране на резултати от измервания и обработка им, като крайна цел е получаване на оценка за действителната стойност на измерваната величина и разширената неопределеност в точката на калибриране на анализатора.

Разработени са алгоритми за калибриране на анализатори на електрическа енергия по: напрежение и ток, активна, реактивна и пълна мощност, $\cos\varphi$ и честота. Тези алгоритми реализират математическите модели за калибриране на посочените величини, представени съответно в т. 3.2.

Алгоритмите за проверка на АЕЕ представят последователността на операциите по управление на еталонния калибратор и проверявания анализатор, генериране на стойности за напрежението от калибратора, провеждане на многократни измервания в точката на проверка, записване на резултати от анализатора, събиране на тези резултати от измервания и обработка им, като крайна цел е получаване на оценка за грешката на анализатора в точката на проверка.

Разработени са алгоритми за проверка на анализатори на електрическа енергия по: хармоници и коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение. Тези алгоритми реализират математическите модели за проверка на посочените величини, представени съответно в т. 3.3.

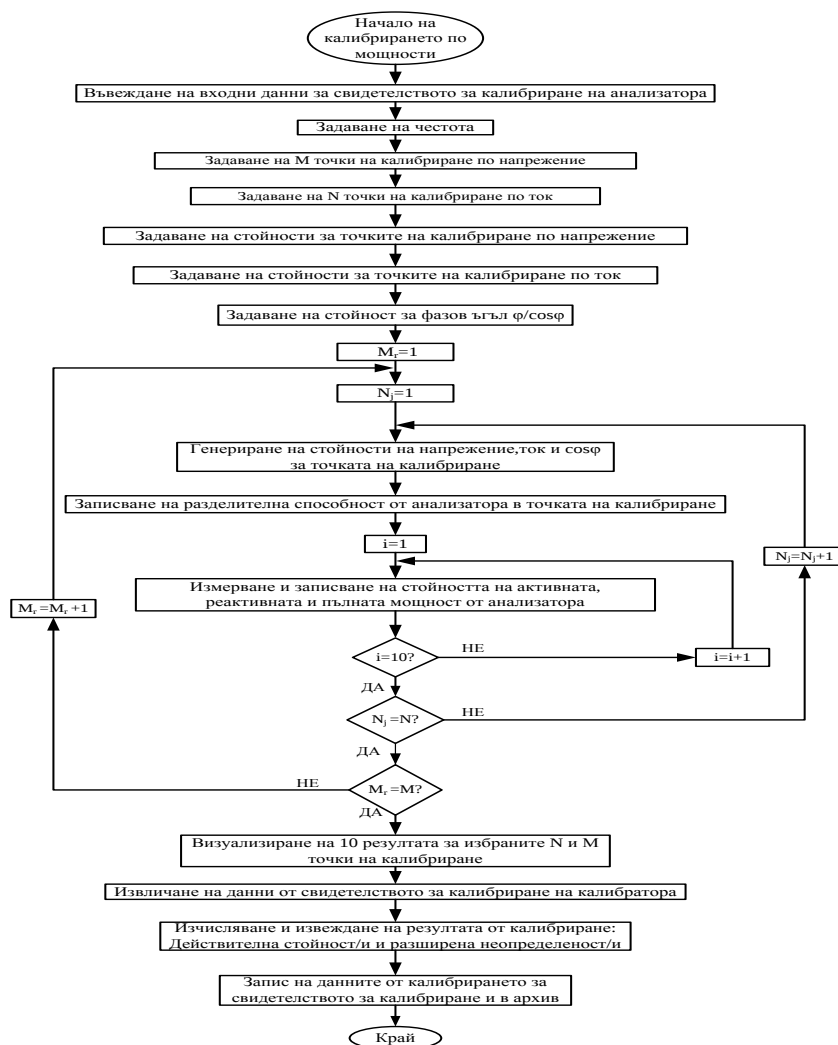
За онагледяване на разработените алгоритми са представени алгоритъм за калибриране и изчисляване на действителната стойност на величината мощност, алгоритъм на работа за проверка на анализатор на електрическа енергия по коефициент на нелинейни изкривявания (THD) и обобщен алгоритъм за работа на виртуална система при калибриране на анализатори на електрическа енергия.

4.1.2. Алгоритъм на калибриране на анализатор на електрическа енергия по активна, реактивна и пълна мощност

Алгоритъмът за калибриране на АЕЕ по активна, реактивна и пълна мощност е базиран на модели на калибриране по посочените мощности, представени в т.3.2.3, т.3.2.4 и т.3.2.5. Последователността на операциите е следната:

- Въвеждат се входните данни, необходими за свидетелството за калибриране: температура, влажност, данни за еталона и неговото свидетелство за калибриране, данни за средството под калибриране, данни за експерта провеждащ калибрирането;
- Задава се стойност на честота на напрежението или тока;
- Задава се броя M на точките на калибриране по напрежение, като по-нататък всяка точка на калибриране има съответен индекс M_i ;
- Задава се броя N на точките на калибриране по ток, като по-нататък всяка точка на калибриране има съответен индекс N_j ;
- Задават се стойности за напрежението и тока за всяка точката на калибриране;
- Задава се стойност за фазовия ъгъл ϕ или за $\cos\phi$;
- Избира се точката на калибриране по напрежение и ток, като се започва от точка N_1 и M_1 ;
- Генерира се зададената еталонна стойност на напрежението и тока от калибратора за точката на калибриране на анализатора;
- Записва се разделителната способност на анализатора в точката на калибриране;
- Записва се всяка измерена i -та стойност (i - брой измервания) на активната, реактивната и пълната мощности от анализатора, като за всяка точка на калибриране N_j (по ток) се правят по 10 измервания. Оценката за измерената стойност на всяка една (активна, реактивна и пълна) от мощностите в точката на калибриране се определя като средна стойност на резултатите от измерванията;
- Проверява се дали има зададена друга точка на калибриране N_j (на тока). Ако има такава се избира нова точка на калибриране като се повтарят предишните стъпки, докато се изпълнят измерванията за всички избрани точки на тока.
- Проверява се дали има зададена друга точка на калибриране M_i (на напрежението). Ако има такава се повтарят предишните стъпки, докато се изпълнят измерванията за всички избрани точки на напрежението.
- Визуализират се 10-те измерени стойности за всяка точка на калибриране N_j и M_i
- За точките на калибриране N_j и M_i се извличат предварително заложили техните данни от свидетелството за калибриране на еталона: действителната стойност и нейната разширена неопределеност.
- Изчисляват се и се визуализират за всички точки на калибриране N_j и M_i , съгласно съответния математически модел (т.3.2.3, т.3.2.4 и т.3.2.5), действителната стойност с отчитане на всички приноси по модела и разширената ѝ неопределеност.
- Всички данни от калибрирането се записват за последваща обработка и в архив за евентуално бъдещо използване.

Блок схемата на алгоритъма за калибриране на АЕЕ по активна, реактивна и пълна мощност е представена на Фиг. 4.2



Фиг.4.2. Алгоритъм за калибриране и изчисляване на действителната стойност на величината мощност.

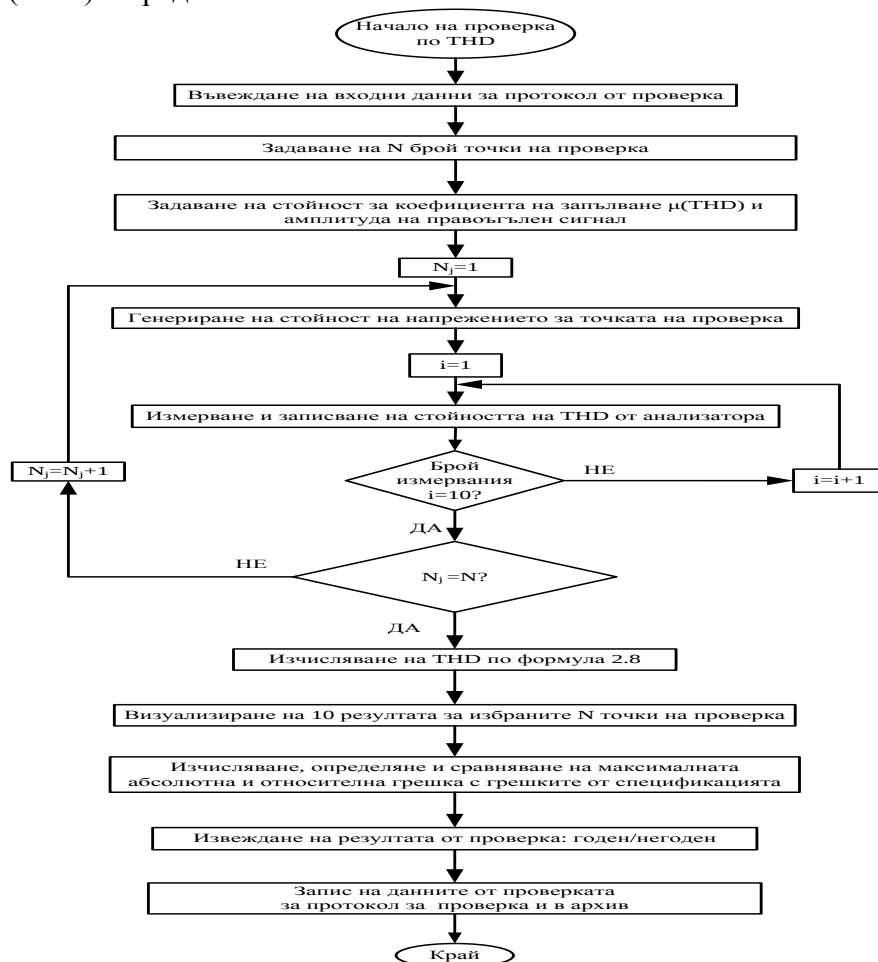
4.1.6. Алгоритъм на проверка на анализатор на електрическа енергия по коефициент на нелинейни изкривявания

Алгоритъмът за проверка на АЕЕ по коефициент на нелинейни изкривявания (THD) е базиран на подхода с използване на периодичен правоъгълен сигнал. Последователността на операциите е следната:

- Въвеждат се входните данни, необходими за протокол от проверка: температура, влажност, данни за еталона и неговото свидетелство за калибриране, данни за средството под проверка, експерта провеждащ процедурата по проверка.;
- Въвежда се стойност за грешката на анализатор от техническата документация;
- Задават се N_j броя точки – коефициенти на запълване на правоъгълния сигнал, които ще се използва за проверка по коефициент на нелинейни изкривявания;
- Задава се точка на проверка, която се определя чрез задаване на стойност на коефициента на запълване на периодичното правоъгълно напрежение, чиято честотата е фиксирана на 50 Hz.
- Генерира се стойността на напрежението с правоъгълна форма със зададения коефициент на запълване в точката на проверка на анализатора;
- Записва се всяка измерена от анализатора i -та стойност (i -брой измервания) за THD. Като за всяка избрана точка на проверка N_j се правят по 10 измервания. Оценката за всяка измерена стойност в точка на проверката се определя като средна стойност на резултата от измерванията;

- Проверява се дали има зададена друга точка на проверка N_j . Ако има такава се избира нова точка на проверка като се повтарят предишните стъпки, докато се изпълнят измерванията за всички избрани точки на проверка по THD.
- Визуализират се 10-те измерени стойности за всяка точки на проверка N_j .
- За точките на проверка N_j , по предложения подход в Глава 2 ф-ла (2.8), се изчисляват стойностите за всеки един от коефициентите на нелинейни изкривявания по зададените стойности коефициента на запълване μ . Извършва се математическа обработка на измерените от анализатора резултати и се определят стойностите на абсолютната и относителната грешки;
- Получения резултат за максималните абсолютна и относителна грешки се сравняват със зададените стойности на грешките от спецификацията на анализатора в началото на алгоритъма.
- Изчисляват се и се визуализират за точката на проверка резултата годен или негоден, т.е. отговаря ли на зададените по спецификация стойности или не;
- Всички данни от проверката се записват за последваща обработка и в архив за евентуално бъдещо използване.

Блок схемата на алгоритъма за проверка на АЕЕ по коефициент на нелинейни изкривявания (THD) е представена на Фиг. 4.6

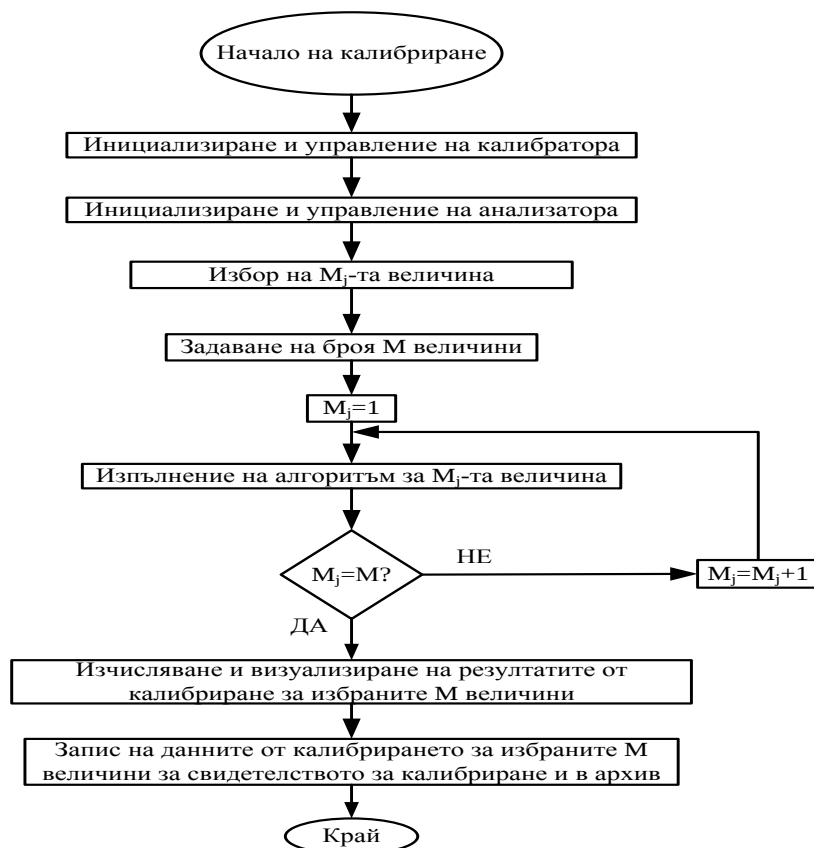


Фиг.4.6. Алгоритъм на работа за проверка на анализатор на електрическа енергия по коефициент на хармонични изкривявания (THD)

4.2. Обобщен алгоритъм за работа на виртуална система при калибриране на анализатори на електрическа енергия

След стартиране се инициализират адресите за комуникация на калибратора и калибрирания анализатор. Избира се съответната входна величина, за която ще се извърши калибрирането. Задават се точките на калибриране и съответните входни величини.

Съгласно избраната j -та величина се следват спецификите на алгоритмите за калибриране на съответната величина. Записва се всяка стойност, отчетена от анализатора, както и неговата разделителна способност. За всяка избрана точка на калибриране се правят измервания, които се отчитат от анализатора. Прави се проверка дали е зададена друга величина на калибриране, ако има такава се повтарят предишните няколко стъпки, докато се изпълни за всички избрани величини за калибриране. Следващата стъпка на алгоритъма е да изчисли, съгласно съответният математичен модел в Глава 3, всички приноси за неопределеността по модела за избраните стойности на калибриране. Алгоритъмът визуализира резултатите, а след това извежда резултатите от калибрирането – действителна стойност и разширена неопределеност на всяка избрана величина за калибриране. Обобщеният алгоритъм за калибриране на АЕЕ е представен на Фиг. 4.7.



Фиг.4.7. Обобщен алгоритъм за работа на интегрирана виртуална система при калибриране на анализатори на електрическа енергия

ГЛАВА 5. ВИРТУАЛНА СИСТЕМА И ВИРТУАЛНИ ИНСТРУМЕНТИ ЗА КАЛИБРИРАНЕ И ПРОВЕРКА НА АНАЛИЗАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

5.1. Виртуална система за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия

Актуална тенденция през последните две десетилетия е създаването на специализирани компютърно базирани средства за измерване, реализирани чрез виртуални инструменти. На тяхна база е възможно реализирането на виртуална система за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия (ВСКПАЕЕ) [А3].

При калибрирането и проверката чрез ВСКПАЕЕ се използва метода на еталонния сигнал – фиг.1.1.

Структурната схема на ВСКПАЕЕ е представена на Фиг.5.1, която се състои от следните три основни функционални блока: еталонно средство – калибратор, средство за калибриране – анализатор на електрическа енергия и персонален компютър с инсталиран програмен продукт LabVIEW.

При реализирането на ВСКПАЕЕ трябва да се постигнат следните основни функции:

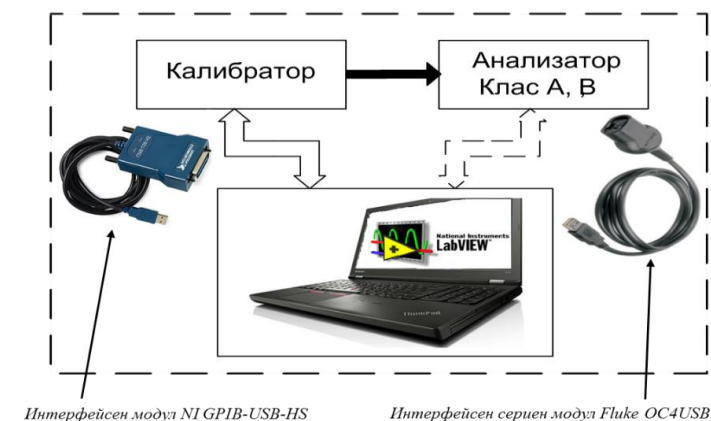
- Автоматично калибриране/проверка на АЕЕ по избраната величина или избраните величини;
- Автоматична обработка на резултатите от измерване на АЕЕ;
- Автоматично извеждане на резултатите от калибриране/проверка на АЕЕ;
- Съхранение на данните от калибриране/проверка на АЕЕ.

Изпълнението на посочените функционалности на виртуалната система за калибриране/проверка на АЕЕ се реализират чрез съответните изисквания към техническото, програмното осигуряване и интерфейса на виртуалната система, които подробно са описани в дисертационния труд.

За реализирането на виртуална система за калибриране/проверка на АЕЕ се предлагат следните 5 броя виртуални инструменти, които реализират функциите [А3]:

- ВИ 1 - за инициализиране и управление на калибратора. Той трябва да позволява избора и управлението на: задаваната електрична величина, измервателния обхват, стойността на измерваната величина в обхвата и да осигурява комуникация с калибратора при наличие на съответните драйвери.
- ВИ 2 - за инициализиране и управление на АЕЕ. Той трябва да позволява избора и управлението на: измерваната величина, измервателния обхват, отчитане стойността на измерваната величина и да осигурява комуникация със средството за измерване под калибриране/проверка при наличие на съответните драйвери. Към настоящият момент не е разработен такъв инструмент, тъй като няма предоставени от производителя на анализатора синтаксисни кодове за управление и събиране на данни.
- ВИ 3 - за калибриране/проверка на АЕЕ за избраната електрична величина. Той трябва да синхронизира и управлява средствата за измерване, участващи в калибровъчния/проверочния процес на съответната величина, да изчислява, да записва и да визуализира резултатите от измерванията.
- ВИ 4 - за изчисляване на неопределеността на резултатите от измерванията при калибрирането и грешката от проверката на АЕЕ за съответната величина. Той трябва при калибриране да осигурява изчисляване и запис на точковите оценки, стандартните неопределености, разширената неопределеност, а при проверката – максималната грешка, а също така и запис на крайния резултат от калибрирането/проверката.
- ВИ 5 - за визуализация и запис на данните от калибрирането/проверката на АЕЕ за съответната величина. Той трябва да визуализира резултатите от калибриране/проверка в графичен или табличен вид и да ги запази като файл в дискова памет и с опция за автоматично генериране на свидетелство за калибриране.

При разработване на софтуера на ВСКПАЕЕ е използван т. н. “V” – модел, описващ отделните етапи. [36, 107, 108, 109]. Йерархичната организация на програмния код е реализиран в програмната среда LabVIEW. Той включва виртуален инструмент за:



Фиг.5.1. Обобщена структурна схема на ВСКПАЕЕ.

калибриране по напрежение, калибриране по ток, калибриране по мощност (активна, реактивна, пълна), калибриране по честота, калибриране по $\cos\varphi$ и проверка по: хармоници по напрежение, коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение. На базата на тази йерархична структура на програмния код е реализиран лесен за употреба и унифициран потребителски интерфейс на виртуалната система за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия, показан на Фиг.5.4.

На базата на йерархичната структура на програмния код е реализиран лесен за употреба и унифициран потребителски интерфейс на виртуалната система за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия, показан на Фиг.5.4.

С предложената ВСКПАЕЕ може да се извършва калибриране по следните електрични величини: напрежение, ток, активна мощност, $\cos\varphi$ и честота и проверка по хармоници и коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение. За всяка от тези величини е разработен конкретен ВИ. Той отчита общите и специфичните операции при калибриране и проверка на АЕЕ за съответната величина.

5.2. Виртуални инструменти за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия

При разработването на виртуалните инструменти са използвани мултифункционален калибратор Metrix CX1651 и анализатор на електрическа енергия Fluke435.

Виртуалните инструменти за калибриране и проверка на анализатори на параметри на електрическа енергия са разработени да изпълняват процедурите, съгласно заложените модели по съответните величини посочени в Глава 3, като следват предложените алгоритми указани в т.4.1 за всяка величина. Алгоритмите не са изпълнени в пълен обем, а именно не извършват управление и четене на данните от анализатор на електрическа енергия. Към настоящият момент няма наличен драйвер за използвания при експериментите анализатор, също така не са предоставени от производителя на анализатора синтаксисни кодове за управление и събиране на данни.

Всички виртуални инструменти са проектирани и разработени с програмно осигуряване чрез програмната среда LabVIEW. Разработени са следните виртуални инструменти за съответните величини - ВИ за калибриране по: напрежение (т. 5.2.1), ток (т. 5.2.2), активна мощност (т. 5.2.3), $\cos\varphi$ (т. 5.2.4), честота (т. 5.2.5), и ВИ за проверка по: хармоници по напрежение (т. 5.2.6) и коефициент на нелинейни изкривявания (т. 5.2.7) по напрежение.

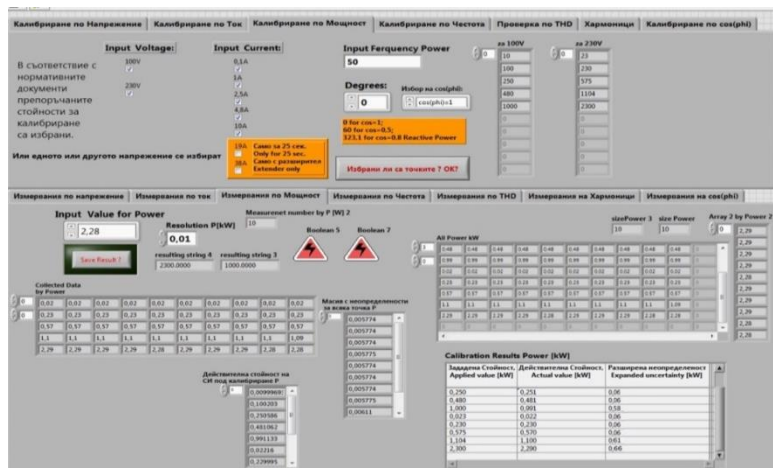
5.2.3. Виртуален инструмент за калибриране на анализатори на електрическа енергия по активна мощност

При реализирането на ВИ за калибриране на АЕЕ по величина активна мощност от Фиг. 5.22. се следва предложения математически модел и алгоритъм. Показан е лицевият панел на ВИ за калибриране на АЕЕ по електрическа мощност, представящ описаните в алгоритъма операции и резултати.

За цялостната реализация на инструмента, с цел улесняване на поставената задача, както и за тестване на отделните стъпки при реализацията му, той е съставен от няколко подвиртуални инструмента. Модулността позволява, ако е необходимо, бърза и лесна манипулация при евентуални промени в използваните средства за измерване. Основните стъпки при реализирането на ВИ са представени в следващите фигури, които са част от потребителския интерфейс и съответстващите им блок диаграми от програмния код на виртуалната система.

Експертът, ползващ ВСКПАЕЕ избира адреса за комуникация с еталонното средство за измерване, величината, името на експерта който извършва калибрирането. Въвеждат се също така данни за: протокол от калибриране на съответната лаборатория, вида на еталона, собственик на АЕЕ, температура и влажност. ВИ ще създаде файл в посочена от оператора папка на компютъра, който в името си съдържа калибрирания АЕЕ, величината – активна мощност, дата и час на извършване на калибрирането. В този файл ще бъдат записани

всички тези начални параметри, както и самите стойности при измерването и обработката на резултатите.



Фиг. 5.22. Потребителски интерфейс на виртуална система за калибриране на анализатори на електрическа енергия по активна мощност.

На Фиг.5.24. е представен част от преден панел и блок диаграма за избор на точки на калибриране по активна мощност. Операторът може да избира от предложените точки на калибриране, избрани в съответствие с нормативните документи. В конкретния случай се избира напрежение 100V и/или 230V, една от трите предложени стойности за $\cos(\varphi) = 1$, $\cos(\varphi) = 0,5$ или $\cos(\varphi) = 0,8$ и съответните токове. Заради модулността на системата, тези точки бързо могат да бъдат коригирани с други стойности, като трябва да бъдат съобразени със свидетелството за калибриране на използвания еталон.

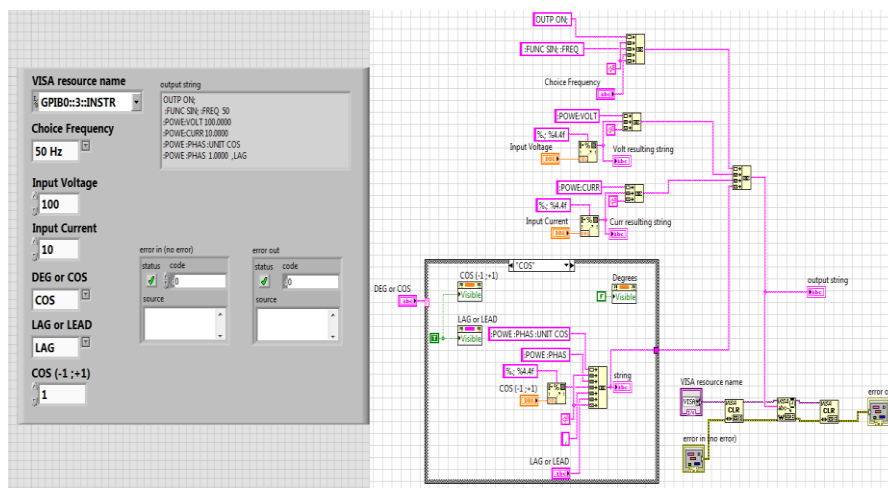
След избор на съответните точки, виртуалната система чака потвърждение, след което генерира масив с избраните стойности.

Показаната част от Блок диаграма на Фиг.5.25, представлява тази част от кода, в който се извършва генерирането на величината и нейното отчитане от уреда под калибриране. ВИ е така създаден, че при смяна на еталонното средство, да може бързо да бъде сменен само драйвера отговорен за управлението на еталона, а не да се реализира наново цялата виртуална система. Измерванията са при съответната избрана стойност за $\cos(\varphi)$, и за различните комбинации спрямо напрежението и тока. При избрани двете стойности на напрежението, първо се извършват итерациите за 100V, а след това тези при 230V със съответните стойности за тока. Ако е избрана само една стойност на напрежението, то се изпълнява само тази част от кода.

При управлението на дадено СИ може да се използва готов набор от драйвери или да бъдат създадени такива. Тъй като в базата данни на производителя на еталона, както и на National Instruments няма готови драйвери за еталона, това наложи тяхното създаване за всяка една величина.

При реализирането на драйвера за управление по мощност, трябва да се съобразят ограниченията на калибратора по величините напрежение, ток, честота и фазова разлика между напрежението и тока, т.е. ъгъл за $\cos(\varphi)$.

Драйвер по мощност е представен на Фиг.5.26, където последователно в програмния код се задават текстово базираните команди за избор на синусоидална форма на сигнала със зададената честота, стойността на напрежението, стойността на тока и избрания от оператора $0 \leq \cos \varphi \leq 1$. Когато е избрано от оператора да се задава стойност на $\cos(\varphi)$, драйвера предоставя възможност, освен да се зададе стойност на тригонометричната функция, да се избере дали товара да бъде с индуктивен или капацитивен характер. Всички тези текст базирани команди се обединяват в един общ текст стринг, който по интерфейса GPIB се предава към калибратора за изпълнение.



Фиг.5.26. Драйвер за Metrix CX1651 за управление на калибратор по мощност, чрез задаване на стойност за $\cos(\varphi)$

Модулността на виртуалните инструменти, използвани във виртуалната система, позволява заради използваните еталонни средства и средствата под калибриране, лесно да бъде модифицирана от затворен тип система за калибриране, когато са налични драйвери и за двете устройства, така и „отворена система“ за калибриране, когато за СИ под калибриране не са налични такива.

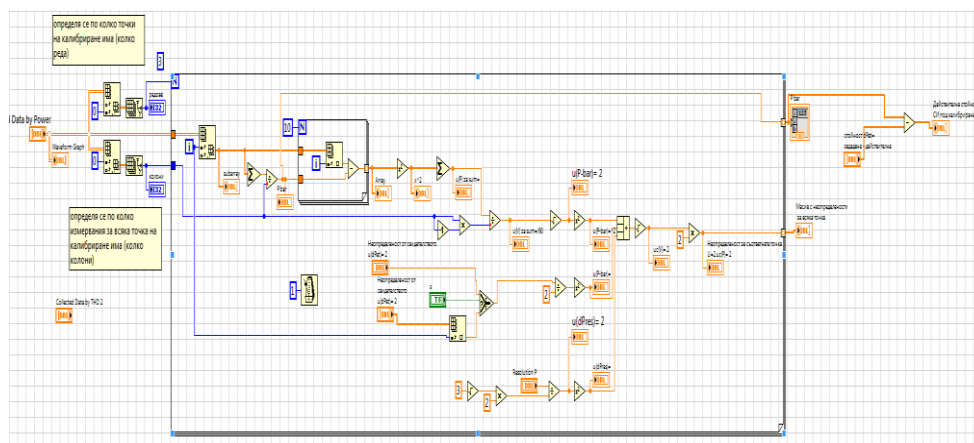
Към настоящият момент не са налични драйвери за използваният анализатор на електрическа енергия, също така не са предоставени от производителя на анализатора синтаксисни кодове за управление и събиране на данни. Затова в програмния код на е заложено операторът да въвежда стойностите за измерваната величина. За всяка избрана стойност на величината се правят по десет измервания, които се запазват в масив от данни за последваща обработка.

След приключване на измерванията данните се „предават“ на следващата стъпка, съгласно предложения алгоритъм, а именно за изчисляване на неопределеността от измерване за всяка точка на калибриране – Фиг.5.27.

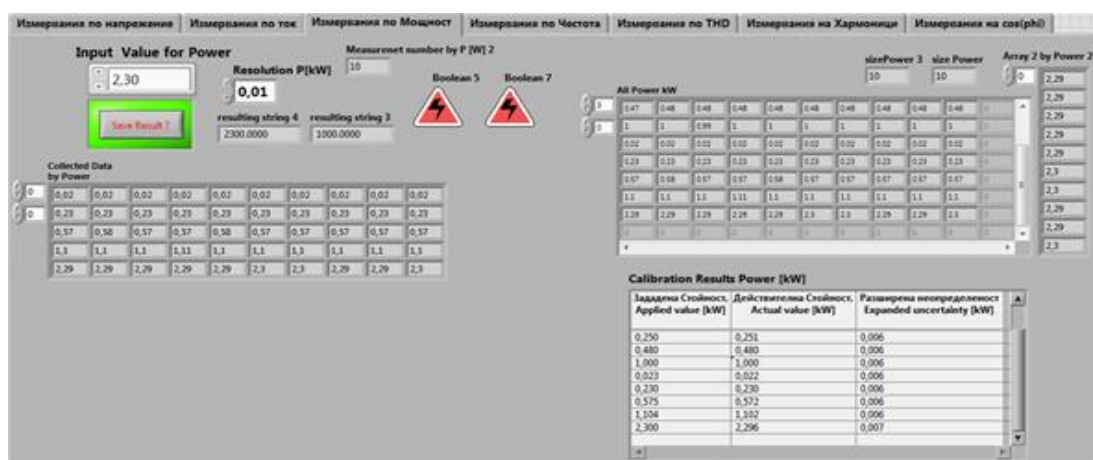
Получените данни от измерване по мощност на АЕЕ, действителна стойност на еталона и неговата неопределеност, се обработват съгласно предложението в т. 3.2.3 математически модел, в представената блок диаграма на Фиг.5.28. Като резултат от тази обработка, на предния панел операторът получава информация (Фиг.5.29.) за всички 10 измервания на всяка избрана точка на калибриране, действителната стойност на величината за средството под калибриране - АЕЕ, както и неопределеността му за всяка точка на калибриране.

Този виртуален инструмент е така реализиран, че автоматично да разпознава избраните от оператора точки на калибриране, да извиква от базата данни за еталона необходимите му стойности и съответно да извърши всички необходими операции и математически операции за изчисляването на крайния резултат от калибриране с цел максимално улеснение на оператора.

Последният етап от работата на виртуален инструмент по мощност е представен на Фиг.5.30. В тази част от програмата поетапно се извършва съхранение на всички необходими данни от калибрирането на АЕЕ по мощност. Всички описани по-горе входни данни, съответните данни от измерване, както и получените резултати, се записват в един файл, който може да послужи като „черен запис“ на една лаборатория за калибриране на АЕЕ.



Фиг. 5.28. Блок диаграма за изчисляване на действителната стойност и неопределеността ѝ за точката на калибриране



Фиг. 5.29. Предния панел с крайни резултати от калибрирането

След приключване и на тази стъпка, е реализирано виртуалната система да се връща към началните си условия и да бъде в готовност за ново стартиране от оператора за извършване на следващо калибриране на АЕЕ по избрана от него величина.

ГЛАВА 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

6.1. Експериментална постановка

Проведените експериментални изследвания имат за цел показване на пригодността на разработените виртуални инструменти, интегрирани във виртуална системата за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия. За калибриране и проверка на АЕЕ с ВСКПАЕЕ е използвана метода на еталонния сигнал (Фиг.1.1). ВСКПАЕЕ е реализирана по схемата от Фиг.5.1 [А3]. Използваните блокове на виртуалната система имат следните функционални възможности и параметри:

1. Еталонен калибратор Metrix CX1651 [56, 55]:
 - Напрежение от 1mV до 1000V;
 - Ток от 1μA до 20 A;
 - Ъгъл на дефазирание между ток и напрежение от 0° до ± 180°;
 - Мощност до 10 kW;
 - Честота от 0,1Hz до 20 MHz;
2. Анализатор на електрическа енергия от клас A, Fluke435 [76]:
 - Измерване на AC RMS напрежения;
 - Измерване на AC RMS токове;

- Измерване на активна, реактивна и пълна мощност;
 - Измерване на честота;
 - Измерване на $\cos\varphi$;
3. Персонален компютър:
- Операционна система Window 7 Enterprise;
 - Операционна памет (RAM) 4GB;
 - Процесор Intel Core 2 Duo E7500 at 2.93GHz
 - Дисково пространство 500 GB;
 - Програмна среда на National Instruments - LabVIEW 2011;
4. Интерфейс за комуникация:
- Интерфейсен модул NI GPIB-USB-HS;
 - Интерфейсен модул Fluke OC4USB;

Към настоящият момент не е разработен драйвер за управление и комуникация с анализатор Fluke435, чрез този интерфейсен модул, тъй като няма предоставени от производителя на анализатора синтаксисни кодове за управление и събиране на данни.

6.2. Експериментални резултати от калибриране и проверка на анализатор на електрическа енергия Fluke435 с калибратор Metrix CX1651

6.2.1. Резултати от калибриране на Fluke435 по напрежение

При експеримента са използвани: математичния модел от т. 3.2.1, алгоритъма по т. 4.1.1 и виртуалния инструмент от т. 5.1.1.

Избраните точки за калибриране на АЕЕ по напрежение са характерни за уредите за измерване на електрическа енергия – електромери. Поради липса на драйвер за управление на Fluke435, измерените стойности от анализатора се въвеждат ръчно в потребителския панел на виртуалния инструмент от оператора.

Резултатите от калибрирането на анализатор Fluke435 по величината напрежение са представени в таблица 6.1. Те включват данните за определените точки на калибриране по напрежение – обхват, зададена стойност от калибратора, действителна стойност и нейната разширена неопределеност.

Таблица 6.1. Резултати от калибриране на анализатор на електрическа енергия по величина напрежение

Обхват, V Range, V	Зададена стойност Applied value [V]	Действителна стойност Actual value [V]	Разширена неопределеност Expanded uncertainty [V]
600	5,00000	5,01	0,01
	11,50000	11,533	0,01
	90,00000	89,94	0,02
	100,0000	109,91	0,02
	110,0000	109,91	0,02
	207,0000	206,91	0,02
	230,0000	229,87	0,10
	253,0000	252,79	0,20
	173,2051	173,13	0,02
	398,3717	398,12	0,20

Резултатите в таблица 6.1 доказват пригодността на предложения математически модел и правилната работа на алгоритъма и на виртуалния инструмент за калибриране на анализатор Fluke435 по напрежение.

6.2.2. Резултати от калибриране на Fluke435 по ток

При експеримента са използвани: математичния модел от т. 3.2.2, алгоритъма по т. 4.1.1 и виртуалния инструмент от т. 5.1.2.

Поради липса на драйвер за управление на Fluke435, измерените стойности от анализатора се въвеждат ръчно в потребителския панел на виртуалния инструмент от оператора.

Резултатите от калибрирането на анализатор Fluke435 по величината ток са представени в таблица 6.2. Те включват данните за определените точки на калибриране по ток – обхват, зададена стойност от калибратора, действителна стойност и нейната разширена неопределеност.

Таблица 6.2. Резултати от калибриране на анализатор на електрическа енергия по величина ток

Обхват, A Range, A	Зададена стойност Applied value [A]	Действителна стойност Actual value [A]	Разширена неопределеност Expanded uncertainty [A]
40	0,100000	0,1	0,06
	1,000000	1,0	0,06
	2,50000	2,5	0,06
	4,80000	4,8	0,07
	10,00000	9,9	0,08
	19,00000	18,9	0,08

Резултатите в таблица 6.2 доказват пригодността на предложения математически модел и правилната работа на алгоритъма и на виртуалния инструмент за калибриране на анализатор Fluke435 по ток.

6.2.3. Резултати от калибриране на Fluke435 по активна мощност

При експеримента са използвани: математичния модел от т. 3.2.3, алгоритъма по т. 4.1.2 и виртуалния инструмент от т. 5.1.3.

Поради липса на драйвер за управление на Fluke435, измерените стойности от анализатора се въвеждат ръчно в потребителския панел на виртуалния инструмент от оператора.

Резултатите от калибрирането на анализатор Fluke435 по величината активна мощност са представени в таблица 6.3. Те включват данните за определените точки на калибриране по активна мощност – обхвати по напрежение и ток, зададена стойност на мощността от калибратора, действителна стойност на мощността и нейната разширена неопределеност.

Таблица 6.3. Резултати от калибриране на анализатор на електрическа енергия по величина активна мощност

Обхват, MW Range, MW	Приложени стойности, Applied values			Зададена стойност на мощността, W Measured value, W	Действителна стойност на мощността, W Reference value, W	Разширена неопределеност на измерването, Expanded uncertainty of measurement
	Напрежение, V Voltage, V	Ток, A Current, A	cosφ			
20,00	100	0,10	1	10,0000	10,0	0,30
		1,00		100,0000	100,2	0,30
		2,50		250,0000	250,6	0,31
		4,80		480,0000	481,1	0,31
		10,00		1000,000	991,1	0,58
	230	0,10	1	23,0000	22,2	0,30
		1,00		230,0000	230,0	0,31
		2,50		575,0000	570,5	0,31
		4,80		1104,0000	1104,1	0,61
		10,00		2300,000	2289,6	0,66

Резултатите в таблица 6.3 доказват пригодността на предложения математически модел и правилната работа на алгоритъма и на виртуалния инструмент за калибриране на анализатор Fluke435 по активна мощност.

6.2.4. Резултати от проверка на Fluke435 по хармоници по напрежение

При експеримента са използвани: математичния модел от т. 3.3.1, алгоритъма по т. 4.1.5 и виртуалния инструмент от т. 5.1.6.

Стойността на хармониците по напрежение се изчислява теоретично на база на зададените параметри за генериране на периодичен правоъгълен сигнал от калибратора. Измерването на хармоници, чрез анализатори на електрическа енергия се извършва за

стойностите на хармоници, които са функция на коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал.

Поради липса на драйвер за управление на анализатора, измерените стойности от анализатора се въвеждат ръчно в потребителския панел на виртуалния инструмент от оператора.

Резултатите от проверката на анализатор Fluke435 по хармоници по напрежение са представени в Таблица 6.4., Таблица 6.5. и Таблица 6.6. Те включват данните за определените точки на проверка по хармоници по напрежение за три стойности на коефициента на запълване на импулса: 0,25, 0,5, 0,85 – изчислена стойност на напрежението на хармоника на калибратора, измерена стойност от анализатора, абсолютна грешка

Таблица 6.4. Резултати от проверка на хармоници по напрежение при $U_m = 60,0000V$ и $\mu = 0,25$

Хармоник:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Изчислена стойност на напрежението на хармоника на калибратора $U_{m,t}$ [V]	54,019	38,197	18,006	0	10,803	12,732	7,717	0	6,002	7,639
Измерена стойност от анализатора $U_{m,cal}$ [V]	54	38,2	17,9	0	10,8	12,7	7,8	0	5,9	7,6
Абсолютна грешка $\Delta = X_{изм} - X_{дейст}$ [V]	-0,019	0,003	-0,106	0	-0,003	-0,032	0,083	0	-0,102	-0,039
Относителна грешка % $\delta = \frac{\Delta}{X_{изм}} \%$	-0,001	0,0001	-0,006	Inf	-0,001	-0,003	0,011	Inf	-0,017	-0,005

Резултатите в таблици 6.4, 6.5, 6.6 доказват пригодността на предложения математически модел и правилната работа на алгоритъма и на виртуалния инструмент за проверка на анализатор Fluke435 по хармоници по напрежение.

6.2.5. Резултати от проверка на Fluke435 по коефициент на нелинейни изкривявания

При експеримента са използвани: математичния модел от т. 3.3.2, алгоритъма по т. 4.1.6 и виртуалния инструмент от т. 5.1.7.

Стойността на коефициента на нелинейни изкривявания се изчислява теоретично на база на зададените параметри за генериране на периодичен правоъгълен сигнал от калибратора. Измерването на THD, чрез анализатори на електрическа енергия се извършва за стойностите на THD, който е функция на коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал. Поради липса на драйвер за управление на анализатора, измерените стойности от анализатора се въвеждат ръчно в потребителския панел на виртуалния инструмент от оператора.

Резултатите от проверката на анализатор Fluke435 по величината THD са представени в Таблица 6.7. Те включват данните за определените точки на проверка по THD за три стойности на коефициента на запълване: 25 %, 50 %, 75 % – изчислена стойност на THD, действителна стойност от анализатора, абсолютна грешка, относителна грешка и допустима грешка.

Таблица 6.7. Резултати от проверка на анализатор на електрическа енергия по величина THD

Коефициент на запълване duty cycle μ [%]	Изчислена стойност Calculated value [%]	Действителна стойност Actual value [%]	Абсолютна грешка Absolute error [%]	Относителна грешка Relative error [%]	Допустимата грешка % $\delta_{доп} \leq 2,5\%$
25	91,156	90,82	-0,336	-0,37	2,5
50	47,297	47,00	-0,297	-0,63	2,5
75	91,156	90,78	-0,376	-0,42	2,5

Получените стойности за относителната грешка са в съответствие с допустимата стойност на грешката на анализатора по THD, посочена в спецификацията на уреда.

Резултатите в таблици 6.7 доказват пригодността на предложения математически модел и правилната работа на алгоритъма и на виртуалния инструмент за проверка на анализатор Fluke435 по коефициент на нелинейни изкривявания по напрежение.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Дисертационният труд съдържа следните приноси за оригиналност

1. Предложен е нов подход за калибриране и проверка на анализатори на електрическа енергия, с използване на периодичен правоъгълен сигнал, който, в сравнение с подхода на самостоятелни хармоници, дава възможност стойностите на хармониците да се зададат само чрез амплитуда и коефициент на запълване на импулсния сигнал, а стойността на коефициента на нелинейни изкривявания да се зададе само и единствено чрез коефициента на запълване на импулсния сигнал.
2. Извършен е метрологичен анализ при калибриране по хармоници с използване на периодичен правоъгълен сигнал, като е получен аналитичен израз за отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на хармоничната компонента във функция на относителните грешки на задаване на амплитудата и коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал. Определена е функцията на влияние на коефициента на запълване на импулсите. Доказано е, че за всеки хармоник има стойности на коефициента на запълване на импулсите, за които грешката от задаване на стойността на хармоника се определя само от грешката на задаване на амплитудата на периодичния правоъгълен сигнал.
3. Извършен е метрологичен анализ при калибриране по коефициент на нелинейни изкривявания чрез генериране самостоятелни хармонични сигнали, като е получен аналитичен израз за отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на общия коефициент на нелинейни изкривявания във функция на сумата на относителните грешки на задаване на коефициента на нелинейни изкривявания за всеки един хармоник, умножена с нейния съответен коефициент на влияние.
4. Извършен е метрологичен анализ при калибриране по коефициент на нелинейни изкривявания с използване на периодичен правоъгълен сигнал, като е получен аналитичен израз за отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на коефициент на нелинейни изкривявания във функция на относителната грешка на задаване на коефициента на запълване на периодичния правоъгълен сигнал. Определена е функцията на влияние на коефициента на запълване на импулсите, която има минимални стойности за коефициент на запълване по-малък от 0,5.
5. Аналитично е изведен израз за параметъра фактор на мощността като функция на $\cos\varphi$ и коефициентите на нелинейни изкривявания на напрежението и тока. Извършен е метрологичен анализ при калибриране по фактор на мощността с използване на периодични правоъгълни импулси на напрежението и тока, като е получен аналитичен израз за отклонението на зададената от еталонния калибратор стойност на фактора на мощността във функция на относителните грешки на задаване на фазовия ъгъл и коефициентите на запълване на периодичните правоъгълни импулси на напрежението и тока.
6. Предложени са математически модели за изчисляване на действителната стойност на измерваната величина и нейната неопределеност при калибриране на анализатори на електрическа енергия по: напрежение, ток, активна мощност, реактивна мощност, пълна мощност, $\cos\varphi$, честота, хармоник на напрежението и тока, коефициент на нелинейни изкривявания на напрежението и тока, и фактор на мощността.
7. Предложени са математическите модели, използвани при проверка на анализатори на електрическа енергия за хармоник на напрежението и коефициент на нелинейни

изкривявания по напрежение чрез използване на подхода на периодичен двуполярен правоъгълен сигнал.

8. Синтезирани са алгоритми, а на база на тях са разработени виртуални инструменти за калибриране на анализатори за електрическа енергия по: напрежение, ток, активна мощност, реактивна мощност, пълна мощност, $\cos\varphi$ и честота. С разработените виртуални инструменти е проведено калибриране на Fluke435.
9. Синтезирани са алгоритми и са разработени виртуални инструменти за проверка на анализатор на електрическа енергия по хармоници и коефициент на нелинейни изкривявания на напрежение чрез използване на периодичен правоъгълен сигнал. С разработените виртуални инструменти е проведена проверка на Fluke435.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Списък на научните публикации свързани с дисертационния труд

- [A1] **Гълъбов К.**, „Калибриране на енергоанализатори по напрежение и ток“ Сборник доклади на Международен научен симпозиум „Метрология и метрологично осигуряване 2015“, стр. 610 – 614, Созопол 07-11. Септември 2015, България, ISSN 1313-9126
- [A2] **Galabov K.**, I. Kodjabashev. “Summary Algorithm for Calibration of Energy Analyzers by Voltage, Current and Power”, Proceedings of Technical University of Sofia, Volume66, Issue 2, 2016, International Conference Automatics’2016, FA, June 03-05, 2016, Sozopol, Bulgaria, pp. 239-243, ISSN 1311-0829
- [A3] **Galabov K.S.**, Kodjabashev I.N., Tzvetkov P.M. Virtual system for calibration of energy analyzers. Scientific and Technical Conference with International Participation “Devices and Methods of Measurement, Quality Control and Diagnostics in Industry and Transport” October 20, 2016, Omsk, Russia. pp. 179-185, ISBN 978-5-949-41154-4
- [A4] Tzvetkov P., **K. Galabov**, I. Kodjabashev. Some Features and Opportunities for Calibration of Analyzers of Electric Power by Harmonics, Proc. of the 28th International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance 2018", ISBN: 1313-9126, September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria, pp.205-210.
- [A5] Tzvetkov P., **K. Galabov**, I. Kodjabashev. Calibration of energy analyzers by using a periodic squarewave pulse signal. The 3rd All-Russian. Scientific and Technical Conference with International Participation “Devices and Methods of Measurement, Quality Control and Diagnostics in Industry and Transport” October 18 – 19, 2018, Omsk, Russia. pp. 210-218, ISBN 978-5-949-41213-8
- [A6] Tzvetkov P., **K. Galabov**, I. Kodjabashev. Some Features and Opportunities for Calibration of Analyzers of Electric Power by Total Harmonic Distortion. Monthly scientific and technical journal ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA E+E, Vol. 53. No 11-12/2018. pp. 285-288, ISSN 0861-4717.
- [A7] Tzvetkov P., **K. Galabov**, I. Kodjabashev. Some features for calibration of analyzers of electric power by power factor. Списание Електротехника и електроника, (под печат).

SUMMARY

VIRTUAL TECHNOLOGIES FOR CALIBRATION AND VERIFICATION OF ELECTRIC ENERGY ANALYZERS

In the dissertation work specific problems and features of the calibration and the verification of electrical energy analyzers are examined.

Actual data on the current state of the calibration of electricity analyzers in the Republic of Bulgaria, and the requirements for the respective laboratories are presented. The possibilities of

applying modern virtual technologies for the automation of the calibration and the verification activities of electricity analyzers are analyzed.

The possibilities of using a periodic squarewave signal for the calibration of electricity analyzers are discussed. Appropriate metrological analyzes are performed concerning the harmonics calibration and the total harmonic distortion. As a result a calibration approach is developed based on harmonics and the total harmonic distortion coefficient using a periodic bipolar squarewave signal, which is an alternative to the classic approach of generating standalone harmonic signals.

Mathematical models are proposed for calculating the actual value of the measured variable and its uncertainty in the calibration of electric energy analyzer for: voltage, current, power (active, reactive, full), $\cos\phi$, frequency, harmonics (of voltage and current), total harmonic distortion (of voltage and current) and power factor. Mathematical models used for verification of the electrical energy analyzers for: harmonics of voltage and total harmonic distortion coefficient of voltage based on periodic bipolar squarewave signal approach are developed.

Algorithms are designed based on the proposed mathematical models used to calibrate analyzers of electrical energy by: voltage and current, active power, reactive power and full power, $\cos\phi$ and frequency, as well as algorithms used for verification of the analyzers of harmonics and of a total harmonic distortion. Based on these algorithms, relevant virtual instruments for calibration and verification of power analyzers have been developed. Experimental research is conducted of the developed virtual instruments used for calibration and verification of the Fluke 435 electrical energy analyzer with the Metrix CX1651 Calibrator. The experimental results prove the suitability of the designed models and algorithms and the developed virtual instruments for calibration and verification of electricity analyzers.