

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Никола Иванов Македонски

ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЗАГУБИТЕ НА МОЩНОСТ И ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ НА ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ И КОМУНАЛНО-БИТОВИЯ СЕКТОР В УСЛОВИЯТА НА НЕСИМЕТРИЧНИ И НЕСИНУСОИДАЛНИ РЕЖИМИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„доктор”

по докторска програма „Електроснабдяване и електрообзавеждане”
към професионално направление 02.04.15

Научен ръководител: доц. д-р инж. Румен М. Киров

Рецензенти:

1.
2.

Варна
2017

Дисертационния труд е обсъден на 12.май.2017год. в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна от 27.април.2017год. № 215 и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”.

Автор: **инж. Никола Иванов Македонски**

Заглавие: **Изследване и оптимизация на загубите на мощност и електрическа енергия в електроснабдителните системи на промишлени обекти и комунално-битовия сектор в условията на несиметрични и несинусоидални режими**

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Никола Иванов Македонски

ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЗАГУБИТЕ НА
МОЩНОСТ И ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В
ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ НА
ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ И КОМУНАЛНО-БИТОВИЯ
СЕКТОР В УСЛОВИЯТА НА НЕСИМЕТРИЧНИ И
НЕСИНУСОИДАЛНИ РЕЖИМИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Варна
2017

Дисертационния труд съдържа 160 страници, включително 101 фигури, 17 таблици, оформени в увод, четири глави, общи изводи и списък на използваната литература от 94 заглавия, от които 18 на кирилица и 76 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на2017 год. от часа, в зала, на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... год.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД „Докторанти”, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.

1.1 Актуалност на проблема.

Развитието на научно-техническия прогрес е тясно свързано с усъвършенстването на промишлената електроенергетика. Създават се икономични, надеждни системи за електроснабдяване на промишлени предприятия, осветление, автоматизирани системи за управление на електрозадвижване и технологични процеси. Внедрява се микропроцесорна техника, елегазово и вакуумно електрооборудване, нови преобразователни устройства. Всичко това поставя големи задачи пред научно-изследователските, проектантските и монтажните организации, работещи в областта на електрифицирането на промишлеността. В миналото, всички практически проблеми са били решавани почти изключително чрез използването само на пълната, активната и реактивната мощност по основната честота. Тогава задачите, както и оборудването (поради нивото на техническия прогрес) са били такива, че такава теоретична постановка е била напълно достатъчна. Основно мероприятие за повишаване на електроенергийната ефективност е било компенсацията на реактивната мощност. Може да се каже, че компенсацията на реактивната мощност е била продиктувана не толкова от налагани санкции за лош фактор на мощността, но предимно за увеличаването на пропускателната способност на захранващите линии при внедряването на нови производствени мощности. При увеличаването на нивото на достигнатия технически прогрес, вече са възникнали и нови научно - приложни проблеми. Започват да се отчитат новите тогава нелинейни товари и несиметричното разпределение на еднофазните консуматори. С внедряването на силовите полупроводникови елементи и свързаното с тях управление, възникват и проблемите с висшите хармоници и взаимодействието между тях. Като обобщение на ситуацията в областта, може да се каже следното: бурното развитие на технологиите свързано с повишените изисквания при производството в промишлеността, води до внедряването на нови управляеми нелинейни устройства, докато в същото време съществуващите мощностни теории изостават в развитието си.

Една мощностна теория е сбор от информация за свойствата на протичането на енергията в електрическите вериги. Тя е резултат от изследване и опит на много поколения учени и електроинженери. Такава концепция често е използвана в изрази като „мощностна теория на Fryze”, „моментна рѳ

теория” и др. В този контекст това означава начина на интерпретиране на физическите явления в електрическите вериги, предложен от автора. Определенията на дадената мощностна теория в този случай се съпровождат с необходимите формули позволяващи изчисляването на свойствата описващи електрическата верига. Мощностните теории също се използват за минимизирането на загубите. Много статии се публикуват по темата всяка година. Те по един или друг начин се опитват да решат проблемите с качеството на електрическата енергия. Причината е чисто икономическа, тъй като електрическата енергия е стока. Този който печели на пазара е този който има стока с по-добро качество на цена сравнима с тази на конкурентите. Втората причина са допълнителните разходи при работата на една електроенергийна система. Тези допълнителни разходи се дължат на:

- Повишени загуби в резистивните елементи;
- Повишени загуби в двигателите;
- Повреди на кондензаторите;
- Нуждата за повишаването на ефективността на източниците на мощност;
- Повишен ток в неутралния проводник;
- Резонансни явления, причинени от виспи хармоници;
- Спиране на продукцията, причинена от грешни сработвания на системите за защита.

Методите и начините на описване на електрическата енергия и качеството и свързани с подобряването на ефективността на източниците и ефективността на консуматорите при несинусоидални и несиметрични условия не са стандартизирани досега. Това се доказва и от факта, че в изминалите няколко десетилетия международната електротехническа комисия (IEC) променя определението за реактивна мощност няколко пъти [1].

1.2 Проблем.

Определянето на загубите на мощност и електрическа енергия понастоящем се извършва на база на показания на електромери, а различните показатели за качество на електрическата енергия с помощта например на съвременни SCADA системи. Характерно за показанията електромерите е това, че величините (активна, реактивна мощност) снети от тях са осреднени стойности за някакъв интервал от време (например за 15 мин.). С други думи не може да се види влиянието на различни смущаващи физически

процеси, например краткотрайни смущения. Алгоритъмът за пресмятане на реактивната мощност, използван от съвременните статични електромери, се критикува от много автори. Всички съществуващи съвременни алгоритми за определянето на различните показатели за качество, са изградени на базата на бързото преобразуване на Фурие, където и е заложена невъзможността за представяне на нестационарни процеси. От направения в глава втора преглед на съществуващите мощностни теории, става ясно, че дефинирането на различните мощности далеч не е единствено и общоприето. Същевременно изискванията за повишаване на качеството на електрическата енергия и намаляването на загубите на мощност се повишават, като едновременно с това се увеличава делът на нелинейните товари в ЕСС.

Всички разгледани в дисертацията проблеми, водят до следното заключение - няма единна мощностна теория, с която да са съгласни всички (или повечето) учени работещи в областта и освен това съществуващите мощностни теории, не могат теоретично да работят с нестационарни процеси (което се дължи на използването на апарата на преобразуването на Фурие.)

Направеното литературно проучване върху математическия апарат и приложението в областта на вълничковото преобразуване, води до извода, че този вид представяне на величините може да служи както в установени, така и в нестационарни режими.

От друга страна обаче повечето статии в областта на прилагането на вълничковото преобразуване, използват за изчисляването на различни величини изрази подобни на представените в първа глава. Проблемата с тези изрази е в това, че те пресмятат например дадена средна, или ефективна стойност, в целия интервал на наблюдение на изследваната величина. По този начин се губи ползата от използването на такъв вид преобразуване с възможност за време-честотно представяне на изследваната величина. С други думи в използваните изрази не се вижда значението на всеки отделен коефициент от вълничковото преобразуване, а от теорията е известно, че всеки такъв коефициент притежава свойството локално да описва изследваната величина и във времето и по честота.

1.3 Цели и задачи на изследването.

В заключение и на кратко трябва се дефинират проблемите, чрез решаването на които ще могат да се посрещнат нарастващите изисквания за качеството на електрическата енергия и намаляването на загубите на активна мощност, а именно:

1. Избирането на мощностна теория, която най-близко физически да описва електромагнитните явления и която същевременно да позволява анализирането и намаляването на загубите на електроенергия, чрез прилагане на технически мероприятия. Също така избраната мощностна

теория трябва да позволява адекватното заплащане на потребяваната електроенергия, като диференцира неактивните съставки на мощността, която потребителите не използват.

2. Предефиниране на дефинициите на избраната мощностна теория, чрез използването на вълничковото преобразуване, което ще доведе до възможността за анализ и управление на потоците на неактивните мощности, като се намалят и загубите на активна мощност.
3. Съчетаването на горните две точки в единна система за анализ, работеща както в еднофазни, така и в многофазни системи.

1.4 Методи на изследване.

Методите на изследване за осъществяване на теоретичните анализи се базират на дефинициите дадени в стандарта IEEE Std. 1459-2010 за еднофазни и трифазни системи, като за трифазните системи са взети под внимание последните критики и допълнения към този стандарт. Освен това за определянето на необходимия компенсиращ ток се използват дефинициите на теорията за обобщената неактивна мощност. Определенията на всички величини дадени в стандарта IEEE Std. 1459-2010, както и тези на теорията за обобщената неактивна мощност, са предефинирани използвайки предложените модели на моментните стойности на напреженията и токовете, чрез пакетното вълничково преобразуване.

1.5 Научна новост на изследването.

Накратко могат да бъдат посочени следните научни резултати, получени в резултат от работата по дисертационния труд:

1. Представен е теоретичен модел на базата на вълничковото преобразуване за моментните стойности на напрежението и тока. От всички възможни представяния на изследваната величина (който е много голям), е избрано и теоретично обосновано, представяне съобразено със последните теоретични разбирания за подходящото разделяне на честотните компоненти в изследваните величини.
2. Представени са теоретични изрази, чрез които от коефициентите на правото вълничково преобразуване, могат да се извлекат локализирани ефективни стойности на изследваната величина, както във времевата, така и в честотната област. Тази ключова особеност на вълничковото преобразуване, се пропуска, или не се показва от повечето съвременни изследвания в областта.

1.6 Практическа ценност на изследването.

1. Върху основата на посочените теоретични приноси е разработена система за анализ. В разработената система, всички определения дадени в стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23] и последните надграждания върху него [18-40], са предефинирани чрез моделирането на изходните величини с помощта на вълничковото преобразуване. В резултат на това могат да се проследят локалните изменения, или особености на изследваните величини.
2. Разработената система за анализ има възможност за представянето на изследваните величини, в честотно - времевата плоскост. Представянето може да бъде както двуизмерно, така и триизмерно. В резултат на това може да се проведе качествено изследване на локалните изменения на изследваната величина и измененията на съставките ѝ във времето.
3. Разработената система за анализ има възможност за триизмерното представяне на тока, като резултат от приложено въздействие - напрежението и електромагнитните свойства на средата в която той се разпространява. В резултат на това може да се проведе качествено изследване на моментните изменения на тока, както и може да се съди за електромагнитните свойства на средата в която той се разпространява. Триизмерното представяне на тока по този начин също така дава възможност за определянето на характера на товара - линеен, или нелинеен.
4. Представен е алгоритъм за намаляването на загубите на активна мощност в храняващите линии, по време на преходния процес, в еднофазни системи.
5. Разработената система за анализ има възможност да изчислява необходимия компенсиращ ток, така че, ако този ток се инжектира чрез активен филтър, да се получи компенсация на всички неактивни съставки в черпения от източника ток. В резултат, пълния ток, който се черпи от източника е синусоидален и във фаза с напрежението. По този начин се намаляват загубите на мощност и електроенергия от неактивните съставки на пълния ток. Тази възможност е осигурена от определенията на теорията за обобщената неактивна мощност. Всички определения на тази теория също са предефинирани чрез представеното вълничково моделиране.
6. Разработен е софтуер, който имплементира блоковата схема на разработената система за анализ. Входни величини на разработения софтуер са моментните стойности на напреженията и токовете, както и параметрите на вълничковото преобразуване. С помощта на това програмно

обезпечение, могат направо да се обработват сметките от съвременните цифрови системи за сваляне на данни, напрежения и токове.

1.7 Аprobация на изследването.

Основните резултати от проведените изследвания в дисертацията са докладвани и обсъдени на научни форуми, национални и международни конференции:

III Научна конференция - ЕФ 2011, Созопол, България, 30 септември - 3 октомври 2011

XIII International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2011, Varna, Bulgaria, October 2011

7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering - ELEKTROENERGETIKA 2013, Stará Lesná, Slovak Republic, 18 - 20 September 2013

XIV International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2015, Varna, Bulgaria

International Scientific Conference, Gabrovo, Bulgaria, 18-19.November.2016

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.

1 Глава Първа. Литературен обзор върху широк кръг въпроси, свързани с темата на докторантурата.

В първа глава на дисертацията е направен литературен обзор върху широк кръг въпроси, свързани с темата на дисертацията. Разгледан е въпроса със загубите на мощност в различни отрасли на промишлеността. Представените резултати са в резултат от работата на хора от катедра „Електроснабдяване и Електрообзавеждане”, начело с доц. д-р инж. Румен Киров. По-нататък в главата е разгледана историята на вълничковото преобразуване, а след това е направено литературно изследване на същото. Разгледано е също така и приложението на вълничковото преобразуване в областта на електроснабдяването и електрообзавеждането. Показаните резултати са в резултат от анализи на публикувани статии и книги. В резултат от направения анализ са формулирани основни изводи :

1. Болшинството от промишлените обекти не реструктурираха своите ЕСС в съответствие с новите условия на електропотребление с понижено натоварване и това води до влошени технико-икономически показатели в процеса на експлоатация.
2. Реновирането и модернизацията на електрическите съоръжения в електроенергетиката, обуславя рязко намаляване на загубите на мощност и ел. енергия и има своите технико-икономически основания и предимство предвид сравнително приемливите срокове на откупуване, по-ниски от нормативно утвърдените.
3. Определянето на загубите на мощност и електрическа енергия понастоящем се извършва на база на показания на електромери, а различните показатели за качество на електрическата енергия с помощта например на съвременни SCADA системи. Характерно за показанията електромерите е това, че величините (активна, реактивна мощност) снети от тях са осреднени стойности за някакъв интервал от време (например за 15 мин.). С други думи не може да се види влиянието на различни смущаващи физически процеси, например краткотрайни смущения.

Алгоритъмът за пресмятане на реактивната мощност, използван от съвременните статични електромери, се критикува от много автори. Всички съществуващи съвременни алгоритми за определянето на различните показатели за качество, са изградени на базата на бързото преобразуване на Фурие, където и е заложена невъзможността за представяне на нестационарни процеси. От направения в глава втора преглед на съществуващите мощностни теории, става ясно, че дефинирането на различните мощности далеч не е единствено и общоприето. Същевременно изискванията за повишаване на качеството на електрическата енергия и намалянето на загубите на мощност се повишават, като едновременно с това се увеличава дялът на нелинейните товари в ЕСС.

4. Всички разгледани в горната точка (а и в цялата глава) проблеми, водят до следното заключение - няма единна мощностна теория, с която да са съгласни всички (или повечето) учени работещи в областта и освен това съществуващите мощностни теории, не могат теоретично да работят с нестационарни процеси (което се дължи на използването на апарата на преобразуването на Фурие.)
5. Направеното литературно проучване върху математическия апарат и приложението в областта на вълничковото преобразуване, води до извода, че този вид представяне на величините може да служи както в установени, така и в нестационарни режими.
6. От друга страна обаче повечето статии в областта на прилагането на вълничковото преобразуване, използват за изчисляването на различни величини изрази подобни на представените в тази глава. Проблема с тези изрази е в това, че те пресмятат например дадена средна, или ефективна стойност, в целия интервал на наблюдение на изследваната величина. По този начин се губи ползата от използването на такъв вид преобразуване с възможност за време-честотно представяне на изследваната величина. С други думи в използваните изрази не се вижда значението на всеки отделен коефициент от вълничковото преобразуване, а от теорията е известно, че всеки такъв коефициент притежава свойството локално да описва изследваната величина и във времето и по честота.

И накрая в заключение и на кратко трябва да се дефинират проблемите, чрез решаването на които ще могат да се посрещнат нарастващите изисквания за качеството на електрическата енергия и намаляването на загубите на активна мощност, а именно:

1. Избирането на мощностна теория, която най-близко физически да описва електромагнитните явления и която същевременно да позволява анализирането и намаляването на загубите на електроенергия, чрез прилагане на технически мероприятия. Също така избраната мощностна теория трябва да позволява адекватното заплащане на потребяваната електроенергия, като диференцира неактивните съставки на мощността, която потребителите не използват.
2. Предефиниране на дефинициите на избраната мощностна теория, чрез използването на вълничковото преобразуване, което ще доведе до възможността за анализ и управление на потоците на неактивните мощности, като се намалят и загубите на активна мощност.
3. Съчетаването на горните две точки в единна система за анализ, работеща както в еднофазни, така и в многофазни системи.

2 Глава Втора. Анализ на методите за определяне на конвенционалните загуби на мощност и електроенергия и практически-приложни резултати.

Във втора глава е направен анализ на методите за определяне на конвенционални загуби на мощност. Методите са разделени на детерминирани методи за определяне на изчислителния товар и на практически-приложни вероятностно-статистически методи и подходи. Направен е и сравнителен анализ на методите за определяне на загубите на мощност и електроенергия по критерий „значимост и достоверност“. В тази глава е направен и преглед на някои от мощностните теории използвани при анализа на явленията в ЕСС. Направен е и сравнителен анализ на разгледаните мощностни теории, като в резултат от този анализ е избрана теорията за обобщената неактивна мощност, като такава приложима както в еднофазни, така и в многофазни мрежи за изчисляване на необходимия компенсиращ ток, който се инжектира в мрежата от активни филтри. Даден е и числен пример, за компенсирането на неактивната съставка на тока в трифазна мрежа.

- 2.1 Методични основи на изследването и възможности за оптимизация.
- 2.2 Предназначение и класификация на товарите графици.
- 2.3 Детерминирани методи за определяне на изчислителния товар.
- 2.4 Практично-приложни вероятностно-статистически методи и подходи.
- 2.5 Сравнителен анализ на методите за определяне на загубите на мощност и електроенергия по критерии „значимост и достоверност”.
- 2.6 Мощностни теории използвани при анализа на явления в ЕСС.
- 2.7 Сравняване на различни мощностни теории.
- 2.8 Представяне на теорията за обобщената неактивна мощност.

Таблица 2.1: Определения според теорията за обобщената неактивна мощност [25].

| Моментни определения | Ефективни (средноквадратични) определения | Средни мощности | Пълни мощности |
|---|--|---|---------------------------|
| $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ | $U(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{u}^T(\tau) \cdot \mathbf{u}(\tau) \cdot d\tau}$ | | |
| $\mathbf{i}(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_m(t)]^T$ | $I(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}^T(\tau) \cdot \mathbf{i}(\tau) \cdot d\tau}$ | | |
| $\mathbf{i}_a(t) = \frac{P(t)}{U_{ref}^2(t)} \mathbf{u}_{ref}(t)$ | $I_a(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}_a^T(\tau) \cdot \mathbf{i}_a(\tau) \cdot d\tau}$ | | |
| $\mathbf{i}_n(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t)$ | $I_n(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}_n^T(\tau) \cdot \mathbf{i}_n(\tau) \cdot d\tau}$ | | |
| $s(t) = \mathbf{u} \mathbf{i} = \sum_{k=1}^m u_k(t) i_k(t)$ | | $P(t) = \frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t s(\tau) \cdot d\tau$ | |
| $p_a(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_a(t) = \sum_{k=1}^m u_k(t) i_{a_k}(t)$ | | $P_a(t) = \frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t p_a(\tau) \cdot d\tau$ | |
| $p_n(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_n(t) = \sum_{k=1}^m u_k(t) i_{n_k}(t)$ | | $P_n(t) = \frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t p_n(\tau) \cdot d\tau$ | |
| | | | $S(t) = U(t)I(t)$ |
| | | | $P_{app}(t) = U(t)I_a(t)$ |
| | | | $Q(t) = U(t)I_n(t)$ |

2.9 Изводи към Втора глава.

1. В тази глава са подбрани методи с интегрални характеристики, при които за разлика от методите с диференциран подход загубите не се определят по отделни звена и елементи (отделно за СТ, храняващи линии, потребители и др.), а глобално за ЕСС като цяло. Всички разгледани методи са приложими за ниско, средно и високо напрежение.
2. Първите няколко метода имат основно детерминиран характер. Те използват данни от измервателните прибори за W_i , $P_{\text{ср}}$, P_{max} и др. величини схемотехническа информация за параметрите на линиите (сечения, дължини, съпротивления), а също така информация за режимните параметри (τ , K_z , $K_{\text{ф}}$, D и др.). Точността на методите се определя от достоверността на информацията, която много често има ограничена пълнота, зависи от субективни фактори, така че освен систематичен тя има и случаен характер. Метода на средните товари и метода с τ , се характеризират с голям брой допускания и условности за τ , $K_{\text{ф}}$, K_z . Това внася допълнителна постоянна неточност, а също така и погрешност от неадекватност, изразяваща се в несъвпадане по време на характеристиките на отделните елементи с тези на мрежата като цяло.
3. Мрежите СН и НН в промишлените обекти поради своята сложност се характеризират с ниска степен на достоверност и пълнота при обследване на параметрите им, което води до неточности в разчетите. Това обуславя и високата по литературни данни погрешност при метода на обобщената информация (до 37%), който е приложим основно за мрежи НН.
4. С висока адекватност и значимост са регресионните методи, построени на базата на ТПЕ. Получените многофакторни ММ, могат да отчетат различни схемотехнически промени, а също и динамиката на режимните параметри, което ги характеризира с висока достоверност и точност. Тези обстоятелства превръщат вероятностно-статистическите подходи, респективно ТПЕ, в доста привлекателни за изследователите, още повече, че методологията на планирания експеримент позволява решаване на оптимизационни задачи. Друга положителна черта на метода е, че може да се увеличава броя на СФ при изследването с което се увеличава достоверността на информацията. Самото изследване с такъв голям брой фактори не е проблем при използване на съвременно софтуерно осигуряване.
5. Трябва задължително да се отбележи, че използването на апарата на ТПЕ, води до висока точност само при т.нар. активен експеримент

-
- (когато може да се влияе реално върху съществените фактори). Невъзможността да се проведе такъв води до т.нар. пасивен експеримент - когато от извлечените графици на съществените фактори, се наблюдава зададената в плана на експеримента, точно определената комбинация на съществените фактори.
6. В направеното изследване са представени количествени оценки на погрешността и нивата на обосновааност и твърдост за известни от теорията и практиката детерминирани и вероятно - статистически методи. Показана е градацията на тези методи по цитираните показатели и е потвърден по неоспорим начин приоритета на статистическите подходи пред детерминираниите.
 7. Както беше показано при представянето на теорията за обобщената неактивна мощност, почти всички важни променливи са определени изцяло във времевата област, без преобразуване на Фурие, комплексни променливи и др.
 8. От направеното изследване с помощта на GINAPT се вижда, че пълната мощност може да бъде определена без определяне на фазовият ъгъл между тока и напрежението.
 9. Може да се каже, че активният ток е този ток, който се черпи от товара и извършва полезна работа. Това означава, че това е оптималният ток от гледна точка на компенсацията. Това може да се постигне, чрез инжектирането на неактивният ток с обратен знак (посока), от активни филтри.
 10. Същевременно в литературата е посочена възможността, изчисления неактивен ток да се раздели на съставки, които да се компенсират от активен филтър и съставки, които да се компенсират от пасивни филтри. Възможността за задаване на отправно напрежение осигурява тази възможност.
 11. Ако можем да кажем, кой е оптималният (в някакъв смисъл) ток в дадена ситуация, то следва, че ние можем да анализираме някакви технически мероприятия за компенсацията на неактивната мощност в същата ситуация.
 12. Същевременно трябва да се направи важната забележка, че всички теории основани на базата на работата на Fryze (каквато е и GINAPT), не могат да различават отделните хармоници, а оценяват тяхното общо действие. В този смисъл, тази теория не може да служи за детерминиран анализ на електромагнитните явления.

13. Още веднъж обаче трябва да се подчертае възможността за прилагането на GINAPT както в еднофазни, така и в многофазни системи, при всякакви условия за изчисляването на необходимия компенсиращ ток, за което е и създадена тази мощностна теория.

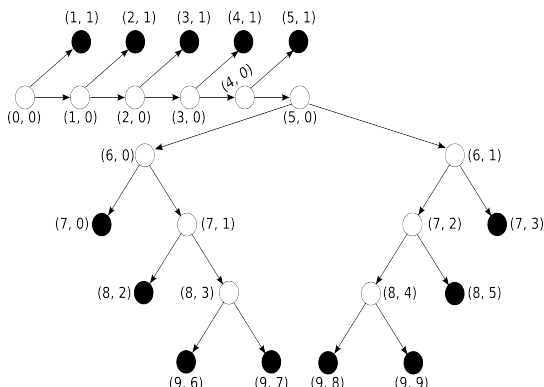
3 Глава Трета. Теоретични и практически – приложни постановки за определяне на загубите на мощност от влошени показатели за качеството на ел. енергия.

В трета глава са разработени теоретични и практически-приложни постановки за определяне на загубите на мощност от влошени показатели за качество на електрическата енергия. Тук е представен теоретичен модел на напрежението и тока на базата на вълнички. Този модел е съобразен специално с използваните мощностни теория в областта, като честотните компоненти са разделени по аналогия с преобразуването на Фурие. В тази глава също така са предефинирани определенията на стандарта IEEE 1459-2010 за монофазна система с помощта на предложеното моделиране на напреженията и токовете, чрез вълнички. За трифазна система също е направено подобно предефиниране, но също така са взети под внимание последните критики и допълнения към този стандарт.

3.1 Моделиране на напрежението и тока с помощта на пакетното вълничково преобразуване.

Естествено възниква въпроса за оптимално представяне. В различни литературни източници [2; 27] може да се види алгоритъм за т.нар. най-добро представяне. Този алгоритъм обаче, е изведен така, че даден сигнал да бъде представен с възможно най-малко коефициенти. С други думи от гледна точка на максимална компресия.

При анализа на напрежението и тока в ЕСС обаче е необходима друга гледна точка. Може да се изходи от това, че в различните съществуващи мощностни теории (повече от 20), представянето на величините е от вида :



Фигура 2.1: Предлагана схема за представянето на напрежението или тока в ЕСС на ПП.

$$x(t) = X_0 + x_f(t) + \sum_{\nu=2}^{\infty} x_{\nu}(t) \quad (3.15)$$

където: X_0 - постоянна съставяща; $x_f(t)$ - съставяща с фундаментална честота; $\sum_{\nu=2}^{\infty} x_{\nu}(t)$ - сума от съставки с честота различна от основната.

Такова представяне е възможно и чрез ДПВП, като се предлага схемата показана на фиг. 2.1.

Посочените с тъмни кръгчета в ДПВП дървото възли, са минимално необходимите, така че с честотните си ленти възлите да покриват целия честотен интервал от нула до честотата на Найкуист. Освен това избора на точно такова представяне е направен с цел от изследваната величина да бъде отделена ясна честотна лента, така че фундаменталната съставяща в изследваната величина да може да бъде извлечена. Такова представяне дава възможност за максимална аналогия с представянето чрез реда на Фурие.

С предложената схема се постига следния модел на изследваната величина :

$$\begin{aligned} x(t) = & \sum_{m=0}^2 \sum_{k=0}^{\overline{LFC[m][0]} - 1} W_{LFC[m]}[k] 2^{-\frac{LFC[m][0]}{2}} \psi_{LFC[m][1]} \left(2^{-LFC[m][0]} t - k \right) + \\ & + \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9} - 1} W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n \left(2^{-9} t - k \right) + \\ & + \sum_{m=0}^7 \sum_{k=0}^{\overline{HFC[m][0]} - 1} W_{HFC[m]}[k] 2^{-\frac{HFC[m][0]}{2}} \psi_{HFC[m][1]} \left(2^{-HFC[m][0]} t - k \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

където:

$LFC = \{(7, 0), (8, 2), (9, 6)\}$ - набор от наредени двойки числа, като първото число в наредената двойка представлява нивото на декомпозиция j , а второто номера на възела n в това дърво. Така $LFC[0] = (7, 0)$, $LFC[1][0] = 8$ и $LFC[2][1] = 6$. **LFC** - **L**ow **F**requency **C**omponents ;

$HFC = \{(9, 9), (8, 5), (7, 3), (5, 1), (4, 1), (3, 1), (2, 1), (1, 1)\}$ - набор от наредени двойки числа, като първото число в наредената двойка представлява нивото на декомпозиция j , а второто номера на възела n в това дърво. Така $HFC[0] = (9, 9)$, $HFC[1][0] = 8$ и $HFC[2][1] = 3$. **HFC** - **H**igh **F**requency **C**omponents.

При подходящ избор на честотата на дискретизация, ширина на честотната лента, дълбочина на ДПВП, и брой дискрети, фундаменталната компонента в

изследвания сигнал попада в лентата на пропускане на $W_{9,7}$ и $W_{9,8}$ (средната сума в израза (3.16)). Всички честотни компоненти в границите от нула до долната граница в лентата на пропускане на възел $W_{9,7}$ са с честота по-ниска от тази на фундаменталната съставляща (първата сума в израза (3.16)). Всички честотни компоненти в границата от горната граница в лентата на пропускане на възел $W_{9,8}$ са с честота по-висока от тази на фундаменталната съставляща (последната сума в израза (3.16)). Аналогията с реда на Фурие е, че там се съдържат висшите хармоници.

За отбелязване е, че такова представяне на изследваната величина, чрез вълнички, включва всички съставки на величината, като - дискретни хармоници, субхармоници и интерхармоници, а също така изменението на изследваната величина, както в преходен, така и в установен режим.

3.2 Определяне на загубите на мощност.

Определянето на загубите на мощност става, чрез определенията дадени в стандарта IEEE 1459 - 2010 [23], както и в [22], а тяхната минимизация - чрез теорията за обобщената неактивна мощност. Новост е използването на дискретното пакетно вълничково преобразуване за представяне на изследваните величини, както и свойството на вълничките да служат като филтър за извличане на различни компоненти от величината, и особено за извличането на първи хармоник.

В таблица 2.2, е дадено обобщение и групиране на величините в еднофазна система, при несинусоидални напрежения и токове.

Таблица 2.2: Обобщение и групиране на величините в еднофазна система, при несинусоидални напрежения и токове.

| Величина, или индикатор | Обединени мощности | Фундаментални мощности | Нефундаментални мощности |
|----------------------------------|--------------------|------------------------|--|
| Пълна | $S(t) [VA]$ | $S_f(t) [VA]$ | $S_N(t) [VA]$ $S_H(t) [VA]$ |
| Активна | $P(t) [W]$ | $P_f(t) [W]$ | $P_H(t) [W]$ |
| Неактивна | $N(t) [var]$ | $Q_f(t) [var]$ | $D_I(t) [var]$ $D_U(t) [var]$ $D_H(t) [var]$ |
| Използване на захранващата линия | $PF(t) [-]$ | $PF_f(t) [-]$ | - |
| Замърсяване от хармоници | - | - | $\frac{S_N(t)}{S_f(t)}$ |

В таблица 2.3 са обобщени и групирани мощности и показатели за качество на електрическата енергия в трифазни системи, при несинусоидални и небалансирани напрежения и токове. В таблицата са посочени величини изчислявани на базата на новите дефиниции предложени в [38 - 40], както и

Таблица 2.3: Обобщение и групиране на величините в трифазни системи, при несинусодални и небалансирани напрежения и токове [23; 38].

| Величина, или индикатор | Обединени мощности | Фундаментални мощности | Нефундаментални мощности |
|-------------------------------------|-----------------------|--|---|
| Пълна | $S_e(t) [VA]$ | $S_{e_f}(t) [VA]$ $S_f^+(t) [VA]$ $S_{неб.f}(t) [VA]$ $S_{Uнеб.f}(t) [VA]$ $S_{Iнеб.f}(t) [VA]$ $S_{UIнеб.f}(t) [VA]$ | $S_{eN}(t) [VA]$ $S_{eH}(t) [VA]$ |
| Активна | $P(t) [W]$ | $P_f^+(t) [W]$ | $P_H(t) [W]$ |
| Неактивна | $N(t) [var]$ | $Q_f^+(t) [var]$ | $D_{eI}(t) [var]$ $D_{eU}(t) [var]$ $D_{eH}(t) [var]$ |
| Използване на захранващата линия | $PF(t) [-]$ | $PF_f^+(t) [-]$ | - |
| Замърсяване от хармоници | - | - | $\frac{S_{eN}(t)}{S_{e_f}(t)}$ |
| Небаланс на товара | - | $\frac{S_{неб.f}(t)}{S_f^+(t)}$ | |

новите величини предложени в същите източници. В тази таблица някои от величините са същите като в стандарта IEEE 1459-2010 [23].

3.3 Изводи към Трета глава.

1. Показана е невъзможността на преобразуването на Фурие да представи локалните особености на сигнала. От това произтича необходимостта от представянето на основните величини, които могат да се измерят (токове и напрежения), в локален (вълничков) базис. С това се постига описването на локалните особености на изследваните сигнали, а оттам и производните им величини - всички видове мощности, различни показатели за качество на електрическата енергия и др.
2. Предложен е теоретичен израз (3.16), чрез който да се моделира дадена измервана първична величина - напрежение или ток. За отбелязване е, че такова представяне на изследваната величина, чрез вълнички, включва всички съставки на величината, като - дискретни хармоници, субхармоници и интерхармоници, а също така изменението на изследваната величина, както в преходен, така и в установен режим.
3. Обоснована е възможността за такова представяне (фиг. (2.1)), като

се държи сметка за необходимото разделяне на отделните съставки, така че те да са подходящо разделени при използването им в математическия апарат на някоя мощностна теория, както и в областта на електроснабдяването.

4. Обоснована е близката аналогия (в смисъла на разделянето на честотните компоненти) на изследваната величина представена, чрез предложения модел, с преобразуването на Фурие.
5. Представен е теоретичен израз (3.11) за ефективната стойност на дадена изследвана величина представена чрез вълнички, за всеки отделен коефициент от вълничковото преобразуване, с което се постига конкретна интерпретация за ефективната стойност в конкретна област от времевата и честотната област.
6. Представен е теоретичен израз (3.12) за средно квадратичната ефективна стойност на дадена изследвана величина представена чрез вълнички, за всеки отделен възел от вълничковото дърво, с което се постига конкретна интерпретация за средно квадратичната ефективна стойност за цялата изследвана област от времевата област и честотната област на конкретния възел.
7. Представен е теоретичен израз (3.13) за ефективната стойност на дадена изследвана величина, за дадено ниво. Трябва да се отбележи, че това представяне дава средно квадратична стойност за целия интервал от време, и не може да представи локални особености в изследваната величина. В повечето съвременни статии се дават такива изрази.
8. В тази работа е прието определянето на загубите на мощност да става, чрез определенията дадени в стандарта IEEE 1459 - 2010 [23], както и в [22], а тяхната минимизация - чрез теорията за обобщената неактивна мощност. Новост е използването на дискретното пакетно вълничково преобразуване за представяне на изследваните величини, както и свойството на вълничките да служат като филтър за извличане на различни компоненти от величината, и особено за извличането на първи хармоник.
9. Представени са теоретични изрази за моделирането на моментните и ефективните стойности на различни величини (напрежение, ток, съставки на моментната мощност), чрез предложения модел. Тези модели се използват за предефинирането на определенията дадени от използвания стандарт, а също и определенията на теорията за обобщената моментна мощност.

10. Показано е, че подвижните интеграли използвани при дефинирането на ефективна стойност например, от използвания стандарт, са приложими само при анализ не в реално време. Показано е как трябва да се използват тези дефиниции от системи за анализ работещи в реално време.
11. За дефинирането на ефективното напрежение и ток , са използвани последни разработки, които критикуват дефинициите дадени в използвания стандарт. Също така са посочени и някои нови показатели за качество, базирайки се на критиките към използвания стандарт. Чрез използването на тези нови дефиниции, се променя както смисъла, така и количествената оценка на някои величини.

4 Глава Четвърта. Разработване на система за анализ на загубите на мощност и ел. енергия.

Четвърта глава е посветена на разработването на система за анализ на загубите на мощност и електроенергия. Главата започва с числен пример за практическото използване на дискретното пакетно вълничково преобразуване. Представен е практически алгоритъм за „настройка“ на вълничковото преобразуване, така че напреженията и токовете да могат да се представят с предложения в трета глава модел. По-нататък в главата са дадени блоковите схеми на разработената система за анализ. Разгледани са числени примери илюстриращи работата на системата в еднофазна и трифазна система.

4.1 Практическо използване на дискретното пакетно вълничково преобразуване.

4.2 Разработка на система за анализ.

Всичко започва с моделиране на напрежението и тока с помощта на вълнички, според модела :

$$u(t) = u_f(t) + u_H(t) \quad (4.11)$$

$$i(t) = i_f(t) + i_H(t) \quad (4.12)$$

Избраната честота на дискретизация, както вече стана ясно, е $f_s = 6400[\text{Hz}]$. При тази честота номера на най-високия хармоник е 64. Напрежението и тока постъпват като вектор ред:

$$u[k] = [u[0], u[1], u[2], \dots, u[N - 1]] \quad (4.13)$$

$$i[k] = [i[0], i[1], i[2], \dots, i[N - 1]] \quad (4.14)$$

където размера на извадката е $N = 2^{16} = 65\,536$. Времето между две извадки е $dt = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{6400} = 0,00015625$ [s]. Така за един период броят извадки е $N_T = \frac{T}{dt} = \frac{0,02}{0,00015625} = 128$. Вземайки в предвид размера на извадката и времето между извадките, получаваме, че размера на извадката в секунди е $(N - 1) \times dt = 10,23984375$ [s].

Оформените по този начин извадки на напрежението и тока постъпват в блока за право дискретно пакетно вълничково преобразуване. Използвания тук вълничков филтър е от фамилията симлети и има 36 коефициента.

По този начин от изследваната величина (напрежение, или ток) може да се извлече фундаметалната съставяща, от възли с номера седем и осем, както вече стана ясно. Конкретно, след като извадките на напрежението и тока постъпят в блока за право дискретно пакетно вълничково преобразуване, на изхода от блока се получава масив (матрица) с размери за дълбочина на вълничковото дърво $J = 9$, 2^9 - реда и 2^7 - колони. С други думи в тази матрица, всеки ред отговаря на един възел от вълничковото дърво на ниво девет, а всяка колона в дадения ред - на един коефициент от правото вълничково преобразуване. Нека означим въпросната матрица с $sym^{18}_u W_9$, което означава - матрица с коефициентите от правото ДПВП на ниво девет, използван филтър *sym18*, отнасящи се до напрежението. Тази матрица има вида:

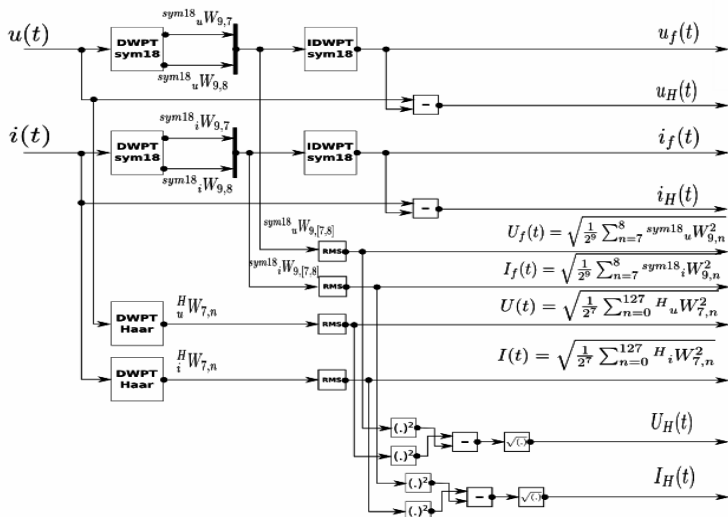
$$sym^{18}_u W_9 = \begin{bmatrix} sym^{18}_u W_{9,0}[0] & sym^{18}_u W_{9,0}[1] & \dots & sym^{18}_u W_{9,0}[127] \\ sym^{18}_u W_{9,1}[0] & sym^{18}_u W_{9,1}[1] & \dots & sym^{18}_u W_{9,1}[127] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ sym^{18}_u W_{9,7}[0] & sym^{18}_u W_{9,7}[1] & \dots & sym^{18}_u W_{9,7}[127] \\ sym^{18}_u W_{9,8}[0] & sym^{18}_u W_{9,8}[1] & \dots & sym^{18}_u W_{9,8}[127] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ sym^{18}_u W_{9,511}[0] & sym^{18}_u W_{9,511}[1] & \dots & sym^{18}_u W_{9,511}[127] \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

След това вземайки само седми и осми ред от тази матрица (с други думи коефициентите от седми и осми възел в двоичното вълничково дърво), чрез обратното вълничково преобразуване се извлича фундаметалната съставка от напрежението или тока, във вида :

$$u_f(t) = \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} sym^{18}_u W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \quad (4.16)$$

На фиг. 2.2 е показана част от блоковата схема на работената система.

На блоковата схема отляво са показани входните величини напрежение и ток. Правото ДПВП при използването на филтър от типа симлет е означено



Фигура 2.2: Блокова схема №1 от разработената система.

като блок с надпис DWPT sym18. Обратното ДПВП при използването на вълничков филтър от същия тип е обозначено като блок с надпис IDWPT sym18. Така гледайки първия ред от блоковата схема, се вижда как се получава фундаменталната съставка от напрежението. При вече получена фундаментална съставка на напрежението, могат да се получат оставащите съставки от напрежението:

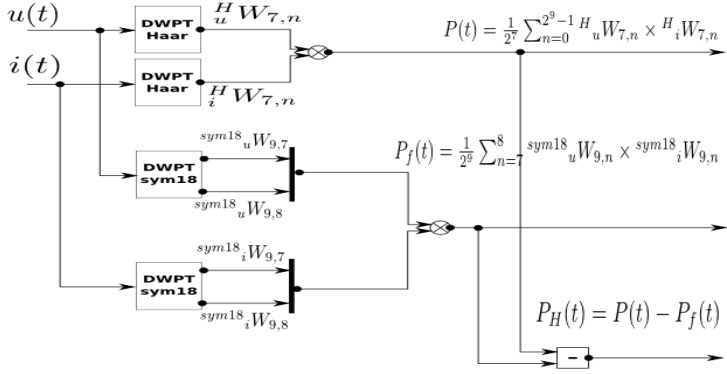
$$u_H(t) = u(t) - u_f(t) \quad (4.17)$$

Ефективната стойност на фундаменталната съставка на напрежението, чрез използването на коефициентите от вълничковото преобразуване, се получават като:

$$U_f(t) = \sqrt{\sum_{n=7}^8 \frac{\text{sym18}_u W_{9,n}^2}{2^9}} \quad (4.18)$$

За изчисляването на ефективната стойност на някоя величина, чрез използването на коефициентите от правото преобразуване, е разработен блок, означен на блоковата схема като RMS. На входа на блока постъпват коефициентите от избраните възли от дървото на ДПВП.

Следващата стъпка е изчисляването на пълната активна мощност, чрез коефициентите от правото вълничково преобразуване. Блоковата схема за изчисляването на различните активни мощности е показана на фиг. 2.3.



Фигура 2.3: Блокова схема №2 от разработената система.

Разработен е специален блок, който взема като входни величини матрици с коефициентите от правото вълничково преобразуване с използването на двата вида използвани вълничкови филтри, и изчислява различните активни мощности. По този начин за пълната активна мощност, която съдържа активната мощност от фундаменталните съставки на напрежението и тока и активната мощност от едноименните съставки, се получава:

$$P(t) = \frac{1}{2^7} \sum_{n=0}^{2^9-1} H_u W_{7,n} \times H_i W_{7,n} \quad (4.23)$$

Активната мощност от фундаменталните съставки на напрежението и тока, се получава чрез използването на вълничков филтър тип симлет, по следния начин:

$$P_f(t) = \frac{1}{2^9} \sum_{n=7}^8 sym^{18}_u W_{9,n} \times sym^{18}_i W_{9,n} \quad (4.24)$$

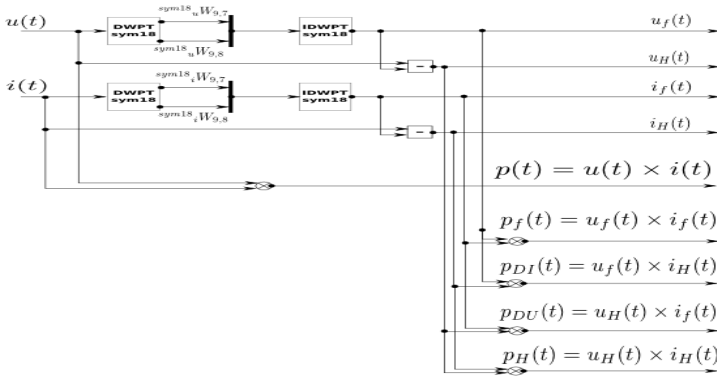
Активната мощност от оставащите едноименни съставки в напрежението и тока се получава съответно като разлика между пълната активна мощност и активната мощност от фундаменталните съставки на напрежението и тока:

$$P_H(t) = P(t) - P_f(t) \quad (4.25)$$

На фиг. 2.4 е показана блокова схема от разработената система, на която е показан начина за изчисляване на различните моментни мощности.

Така например, пълната моментна мощност се получава чрез прякото умножение на дискретизираните напрежение и ток:

$$p(t) = u(t) \times i(t) \quad (4.26)$$



Фигура 2.4: Блокова схема №3 от разработената система.

Моментната мощност от фундаменталните съставки на напрежението и тока, се получава използвайки представянето на величините чрез вълнички и като се използва също така и филтриращите им свойства, като:

$$\begin{aligned}
 p_f(t) &= u_f(t) \times i_f(t) = \\
 &= \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym18}_u W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \times \\
 &\times \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym18}_i W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

Моментната мощност дължаща се на изкривяванията в тока се получава в резултат от умножението на фундаменталната съставка на напрежението и оставащите съставки на тока:

$$\begin{aligned}
 p_{DI}(t) &= u_f(t) \times i_H(t) = \\
 &= \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym18}_u W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \times \\
 &\times \left\{ i(t) - \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym18}_i W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \right\} \quad (4.28)
 \end{aligned}$$

Моментната мощност дължаща се на изкривяванията в напрежението се получава в резултат от умножението на оставащите съставки на напрежението

и фундаменталната компонента на тока:

$$\begin{aligned}
 p_{DU}(t) &= u_H(t) \times i_f(t) = \\
 &= \left\{ u(t) - \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym}18_u W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \right\} \times \\
 &\times \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym}18_i W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \quad (4.29)
 \end{aligned}$$

И накрая моментната хармонична мощност се получава в резултат от умножението на оставащите съставки на напрежението и оставащите съставки на тока:

$$\begin{aligned}
 p_H(t) &= u_H(t) \times i_H(t) = \\
 &= \left\{ u(t) - \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym}18_u W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \right\} \times \\
 &\times \left\{ i(t) - \sum_{n=7}^8 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2^9}-1} \text{sym}18_i W_{9,n}[k] 2^{-\frac{9}{2}} \psi_n(2^{-9}t - k) \right\} \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

На фиг. 2.5 е показана блокова схема показваща как се пресмятат пълната мощност $S(t)$, пълната мощност по фундаменталните съставки $S_f(t)$, нефундаменталната пълна мощност $S_N(t)$, замърсяване от хармоници (**H**armonic **P**ollution) $HP(t)$, хармонична пълна мощност $S_H(t)$, реактивна мощност от фундаменталните съставки $Q_f(t)$, пълнен фактор на мощност (**P**ower **F**actor) $PF(t)$ и фактора на мощността от фундаменталните съставки $PF_f(t)$.

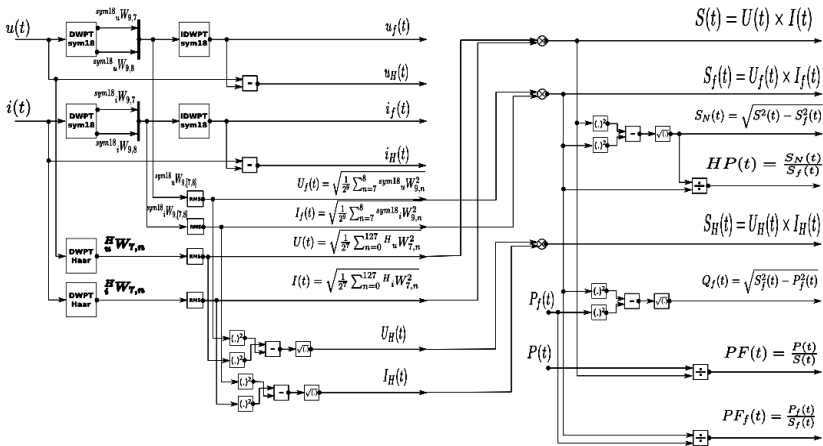
Съответно пълната мощност се получава според израза:

$$S(t) = U(t) \times I(t) = \sqrt{\sum_{n=0}^{127} \frac{H_u W_{7,n}^2}{2^7}} \times \sqrt{\sum_{n=0}^{127} \frac{H_i W_{7,n}^2}{2^7}} \quad (4.31)$$

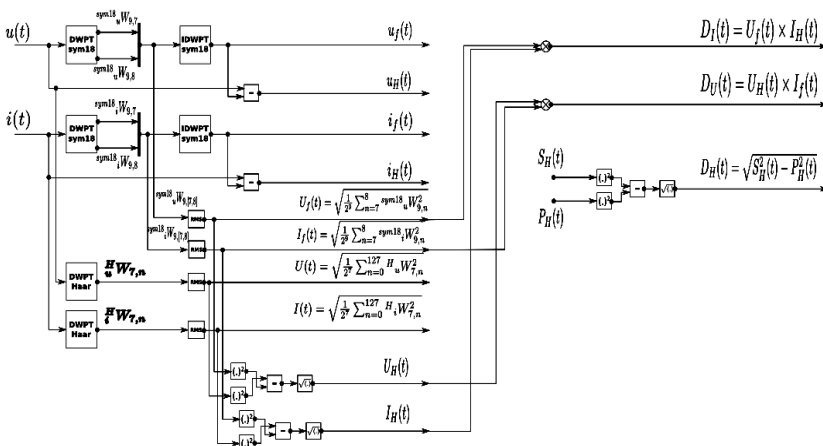
Пълната мощност по фундаменталните съставки и използването на представянето на величините чрез вълнички е равна на:

$$S_f(t) = U_f(t) \times I_f(t) = \sqrt{\sum_{n=7}^8 \frac{\text{sym}18_u W_{9,n}^2}{2^9}} \times \sqrt{\sum_{n=7}^8 \frac{\text{sym}18_i W_{9,n}^2}{2^9}} \quad (4.32)$$

Вижда се, че пълната мощност по фундаменталните съставки е равна на произведението от ефективните стойности на извлечените чрез вълничковото преобразуване, фундаментални съставки на напрежението и тока.



Фигура 2.5: Блокова схема №4 от разработената система.

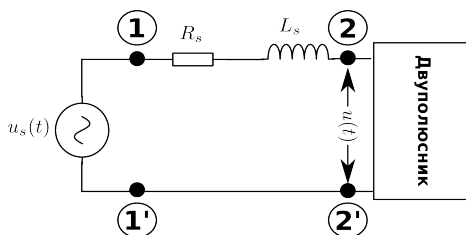


Фигура 2.6: Блокова схема №5 от разработената система.

На фиг. 2.6 е показана блокова схема показваща как се пресмята деформационната мощност, в резултат от деформации в кривата на тока $D_I(t)$, деформационна мощност, в резултат от деформации в кривата на напрежението $D_U(t)$ и хармоничната деформационна мощност $D_H(t)$.

Нека разгледаме схемата показана на фиг. 2.7. Тя се състои от източник на напрежение с произволна форма, захранваща линия с активно съпротивление R_s и индуктивност L_s , а като товар двуполусник, който може да бъде с

произволен характер (линеен, нелинеен и др.).



Фигура 2.7: Еднофазна система, при произволно захранващо напрежение, импеданс на захранващата линия и произволен по характер двуполусник като товар.

Активната мощност доставяна от източника, която се измерва в точките $1 - 1'$ и обозначена като $P^{11'}$ (t), е равна на:

$$P^{11'}(t) = \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u_s(\tau) i(\tau) d\tau \quad (4.47)$$

Тока протичащ през импеданса на захранващата линия, създава пад на напрежение в него, като по този начин напрежението върху клемите на товара $u(t)$, по ефективна стойност не е равно и е по-малко (не се разглежда резонанс) от напрежението на клемите на захранващия източник $u_s(t)$.

$$u_s(t) = u(t) + \Delta u(t) \Rightarrow u(t) = u_s(t) - \Delta u(t) \quad (4.48)$$

Ако товара е линеен, то напрежението върху клемите на товара ще е със същият спектрален състав като този на захранващото напрежение, но отделните спектрални съставлящи ще са с различни амплитуди поради филтриращите свойства на пасивните линейни двуполусници. В резултат, формата на напрежението върху клемите на двуполусника, както и на протичащия ток ще са с различна форма от тази на захранващото напрежение, дори и при пасивен линеен двуполусник.

Ако товара е нелинеен, то протичащият ток ще съдържа висши хармоници, дори и при чисто синусоидално захранващо напрежение, поради това, че тока протичащ през импеданса на захранващата линия създава пад на напрежение, който съдържа висши хармоници. По този начин напрежението върху клемите на товара става несинусоидално, или в общия случай напрежението върху клемите на товара е с различен спектрален състав от захранващото напрежение.

Активната мощност измерена на клемите на товара в точките 2 – 2' и обозначена като $P^{22'}(t)$, е равна на:

$$P^{22'}(t) = \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \quad (4.49)$$

Част от тази мощност се превръща от товара в полезна изходна мощност (механична, топлинна, светлинна, химична), друга част се преобразува в топлина като активни загуби в товара, а ако товара е нелинеен, част от доставяната активна мощност се връща обратно към източника (но на друга честота) и се разсейва като топлина в активното съпротивление на захранващата линия.

Както е известно загубите на активна мощност $\Delta P(t)$ в захранващата линия са равни на:

$$\Delta P(t) = R_s I^2(t) \quad (4.50)$$

Активното съпротивление на захранващата линия в общия случай обаче е неизвестно. Освен това в реалните мрежи, отделни консуматори се включват и изключват, което включва и изключва допълнителни активни съпротивления от техните захранващи линии, а и влиянието на токовото изместване от висшите хармоници е много трудно да се отчете. В резултат, активното съпротивление на захранващите линии може да се определи аналитично твърде приблизително.

Активната мощност измерена на клемите на товара може да се представи като:

$$\begin{aligned} P^{22'}(t) &= \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u(\tau)i(\tau)d\tau = \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t [u_s(\tau)i(\tau) - \Delta u(\tau)i(\tau)] d\tau = \\ &= \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u_s(\tau)i(\tau)d\tau - \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t \Delta u(\tau)i(\tau)d\tau = P^{11'}(t) - \Delta P(t) \end{aligned} \quad (4.51)$$

Както се вижда от този израз, активната мощност измерена на клемите на товара е равна на разликата от активната мощност доставяна от източника и загубите на активната мощност в захранващата линия. По този начин загубите на активна мощност могат да се измерят като разлика между активната мощност измерена на клемите на захранващия източник и активната

мощност измерена на клемите на товара:

$$\Delta P(t) = R_s I^2(t) = \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u_s(\tau) i(\tau) d\tau - \frac{1}{kT} \int_{t-kT}^t u(\tau) i(\tau) d\tau = P^{11'}(t) - P^{22'}(t) \quad (4.52)$$

Този подход е възприет при определянето на загубите на активна мощност в настоящата работа.

4.3 Числени експерименти с разработената система с различен по характер товар в еднофазни системи.

4.3.1 Нелинеен товар при несинусоидално напрежение.

В таблици 2.4 и 2.5 са показани величини изчислявани от разработената система за анализ. В тези таблици са показани точните стойности на двадесет и пет величини, тяхната изчислена стойност и грешката между двете. От таблиците се вижда, че следните шест величини - U, I, P, S, N, PF - се изчисляват „абсолютно” точно, други четири величини - U_f, S_f, Q_f, PF_f - се изчисляват с точност под 0,01 процента. Величините $I_f, P_f, S_H, S_N, D_H, HP$ се изчисляват с точност под 0,09 процента, оставащите величини се изчисляват с точност под 0,18 процента, с изключение на хармоничната активна мощност P_H , за която грешката е под 1,2 процента.

Таблица 2.4: Величини изчислявани от разработената система за анализ - точната им стойност, изчислената стойност и грешката между двете.

| № | Величина | Точна стойност | Изчислена стойност | Грешка [%] |
|----|------------|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | U [V] | 101,558 | 101,558 | $8,4 \cdot 10^{-14}$ |
| 2 | U_f [V] | 100 | 100,003 | 0,00334 |
| 3 | U_H [V] | 17,72 | 17,7012 | -0,106 |
| 4 | I [A] | 103,562 | 103,558 | $6,9 \cdot 10^{-14}$ |
| 5 | I_f [A] | 100 | 99,988 | -0,0117 |
| 6 | I_H [A] | 26,9258 | 26,9693 | 0,161 |
| 9 | P [W] | 8589,12 | 8589,162 | $4,02 \cdot 10^{-12}$ |
| 10 | P_f [W] | 8660,25 | 8659,404 | -0,01 |
| 11 | P_H [W] | -71,092 | -70,24 | -1,196 |
| 12 | S [VA] | 10517,493 | 10517,493 | $-6,92 \cdot 10^{-14}$ |
| 13 | S_f [VA] | 10000 | 9999,163 | -0,0084 |
| 14 | S_H [VA] | 477,127 | 477,388 | 0,0548 |
| 15 | S_N [VA] | 3258,474 | 3261,041 | 0,078 |

Таблица 2.5: Величини изчислявани от разработената система за анализ - точната им стойност, изчислената стойност и грешката между двете (продължение).

| № | Величина | Точна стойност | Изчислена стойност | Грешка [%] |
|----|-------------|----------------|--------------------|------------------|
| 16 | Q_f [var] | 5000 | 4999, 799 | -0, 004 |
| 17 | N [var] | 6069, 9214 | 6069, 92 | -8, 3.10^{-12} |
| 18 | D_I [var] | 2692, 5824 | 2697, 0165 | 0, 165 |
| 19 | D_U [var] | 1772, 0045 | 1769, 913 | -0, 12 |
| 20 | D_H [var] | 471, 8 | 472, 193 | 0, 083 |
| 21 | K_u [-] | 0, 1772 | 0, 177006 | -0, 109681 |
| 22 | K_i [-] | 0, 26925824 | 0, 269724 | 0, 173063 |
| 23 | HP [-] | 0, 32585 | 0, 326131407 | 0, 087 |
| 24 | PF_f [-] | 0, 8660254 | 0, 8660128 | -0, 00145 |
| 25 | PF [-] | 0, 8167 | 0, 8167 | 4, 1.10^{-12} |

На основание на резултатите от този пример, може да се твърди, че разработената система за анализ, която използва представянето на входните величини напрежение и ток чрез дискретното пакетно вълничково преобразуване (право и обратно), работи точно при установени периодични процеси, при нелинейни товари и напрежение съдържащо произволни дискретни висши хармоници. Трябва обаче да се каже, че използвания вълничков филтър тип симлет, дава като резултат в началото и края на изчисляваните величини недопустимо големи грешки дължащи се на голямата дължина на филтъра. Тази особеност на вълничковите филтри различни от типа „Naar”, трябва задължително да се взема под внимание при интерпретацията на резултатите.

4.3.2 Активно - индуктивен товар при синусоидално захранващо напрежение, захранваща линия и преходен режим.

Възможно е определянето на активната енергия от преходната съставка да се възприеме като загуби на активна енергия по време на преходния процес. Основание за това е, че първо - стойността на активната мощност по време на преходния процес е значително по-голяма от стойността на установената активната мощност и второ - възможно е контролиране на тази стойност, или с други думи намаляне на стойността на тази мощност, а оттам и загубите на активна енергия по време на преходния процес.

Активната енергия от преходната съставка може да се определи като:

$$\begin{aligned}
 E'_{\text{пр.}} &= E_{\text{пр.}} - E_{\text{уст.}} = \sum_{i=1}^{n_1} P_i \Delta t_i - \sum_{i=1}^{n_1} P_{\text{уст.}} \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n_1} P_i \Delta t_i - P_{\text{уст.}} \sum_{i=1}^{n_1} \Delta t_i = \\
 &= \sum_{i=1}^{n_1} P_i \Delta t_i - P_{\text{уст.}} n_1 \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{4.62}$$

Оттук нататък съставката $E'_{\text{пр.}}$ можем да наричаме загуба на активна енергия от преходната съставка и ще се означава като $E_{\text{зар.}}$. От последния израз става ясен начина за определяне на загубите на активна енергия от преходната съставка, а именно - чрез получената стъпаловидна крива на активната мощност се изчислява пълната активна енергия в преходен режим и след това от тях се изважда енергията в установен режим, като интервала за изчисляване на енергията се определя от дефинирания по-рано критерий за край на преходния процес. Интервала Δt_i в горния израз е равен на един период, или двадесет милисекунди. Броят интервали n_1 е равен на десет и по този начин за край на преходния процес се приема момента 1,2 секунди.

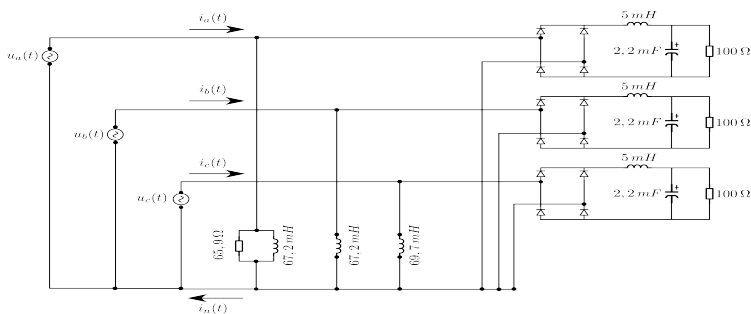
Чрез посочения начин за определяне на загубите на активна енергия в преходен режим, за конкретната схема се получава, че загубите на активна енергия само от преходната съставка са равни на $E_{\text{зар.}} = 95, 2815 \text{ [W s]}$, активната енергия в установен режим е равна на $E_{\text{уст.}} = 306, 9982 \text{ [W s]}$ а пълната енергия по време на преходния режим е равна на $E_{\text{пр.}} = E_{\text{зар.}} + E_{\text{уст.}} = 402, 27967 \text{ [W s]}$. Така може да се твърди, че по време на преходния режим се изразходва $\frac{E_{\text{пр.}}}{E_{\text{уст.}}} = 1, 31$ пъти повече активна енергия. Намалянето или премахването на преходната съставка дава възможност за намалянето на загубите на активна мощност. По този начин управлявайки момента на включване, активната енергия от преходната съставка се намалва от $E_{\text{зар.}} = 95, 2815 \text{ [W s]}$ на $E'_{\text{зар.}} = 41, 01 \text{ [W s]}$. В процентно изражение това представлява намаляване на загубите на активна енергия с:

$$\frac{E'_{\text{зар.}}}{E_{\text{зар.}}} \times 100 = \frac{41, 01}{95, 2815} \times 100 = 43, 04 \text{ [%]}$$

4.3.3 Трифазна мрежа при несинусоидално, несиметрично захранващо напрежение и несиметричен, нелинеен товар.

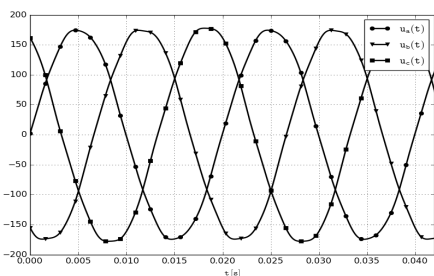
На фиг. 2.8 е дадена схемата на експерименталната постановка използвана в [38] за сравняване на новопредложените величини и изрази за изчисляване на различни мощности спрямо стандарта IEEE 1459-2010.

Както е описано в [38], изследваната схема се състои от симетричен нелинеен товар, състоящ се от три еднофазни двуполупериодни неуправляеми

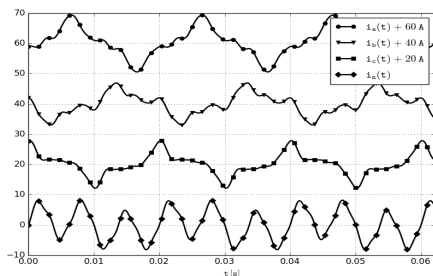


Фигура 2.8: Схема на експерименталната постановка дадена в [38].

изправителя, всеки с LC филтър и активен товар, като параметрите за всеки са: $L = 5$ [mH], $C = 2,2$ [mF], $R = 100$ [Ω]. Паралелно на този товар е свързан несиметричен такъв, състоящ се за фаза А от паралелен активно-индуктивен товар ($R = 65,9$ [Ω], $L = 67,2$ [mH]), за фаза В - от индуктивност ($L = 67,2$ [mH]) и за фаза С също от индуктивност ($L = 69,7$ [mH]). Захранващото напрежение е почти симетрично, като е приблизително около 125 [V]. Кривите на напреженията и токовете са снети с осцилоскоп Lecroy Wavejet 324, както е посочено в [38].



(а) Фазни напрежения.

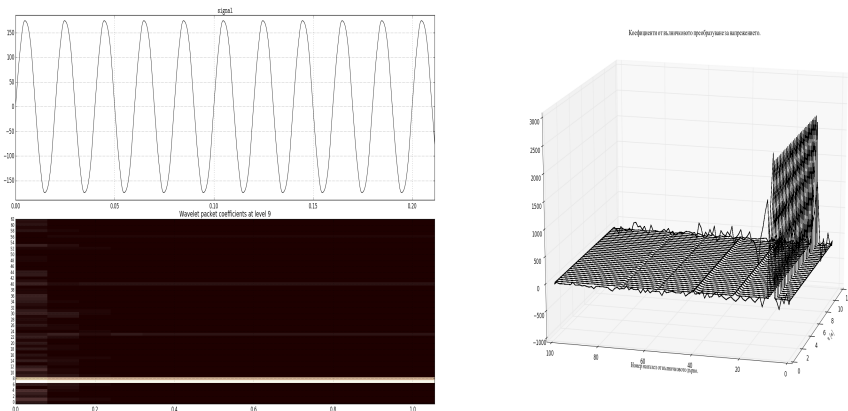


(б) Токове и ток в неутралата.

Фигура 2.9: Напрежения и токове в изследваната верига.

На фиг. 2.9 са представени входните измерени величини - трите фазни напрежения и токове, както и тока в неутралата.

Напрежението на фаза А, както е зададено, се състои от първи, трети, пети, седми и девети хармоник. Тези хармоници ясно се виждат и на двете представяния показани на фиг. 2.10. Дори се вижда и девети хармоник, който е с ефективна стойност 0,6 [V]. Както вече стана ясно, всеки възел от вълничковото дърво има определена честотна лента на пропускане. И на



(а) Захранващо напрежение на фаза А и (б) 3D представяне на коефициентите от вълничковото преобразуване. 2D време - честотна равнина.

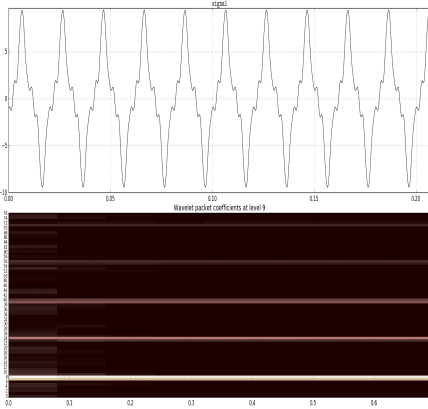
Фигура 2.10: Представяне на коефициентите от вълничковото преобразуване за напрежението на фаза А.

двете представяния се вижда, че хармониците в напрежението се извличат от възли с номера седем и осем, двадесет и трети и двадесет и четвърти, тридесет и девети и четиридесети, петдесет и пети и петдесет и шести и седемдесет и първи и седемдесет и втори. Честотните ленти на пропускане на тези възли (без последните два), бяха показани в случая на еднофазна система. За двойката възли (71 - 72) , честотната лента на пропускане, както и централната честота на тази двойка възли, се получават както следва:

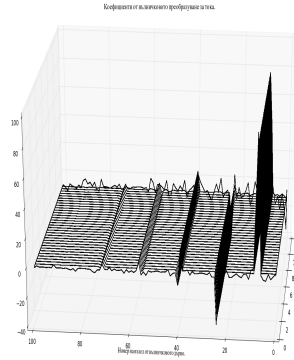
$$BW_{9,(71,72)} = \left[\frac{71f_s}{2^{9+1}}, \frac{(72+1)f_s}{2^{9+1}} \right] = 443,75 \Leftrightarrow 456,25 \text{ [Hz]} \quad f_{c_{9,(71,72)}} = 450 \text{ [Hz]}$$

На фиг. 2.11 са дадени същите представяния на коефициентите от правото вълничково преобразуване, както са обяснени за напрежението. Гледайки време - честотната плоскост за напрежението и тока, уверено може да се твърди, че всички хармоници присъстват през цялото време, което се обхваща от извадките за напрежението и тока, или с други думи може да се твърди, че това е установен процес. Така гледайки тези две различни представяния на коефициентите от правото вълничково преобразуване, може качествено да се установят присъстващите хармоници в изследваната величина, както и характера на протичащия процес - установен, неустановен (преходен), различни смущения в даден момент от времето.

На фигури 2.12(а) и 2.12(б) са изобразени изчислените от разработената система за анализ, съответно: деформационна мощност, в резултат от



(а) Ток на фаза А и 2D време - честотна равнина.



(б) 3D представяне на коефициентите от вълничковото преобразуване.

Фигура 2.11: Представяне на коефициентите от вълничковото преобразуване за тока на фаза А.

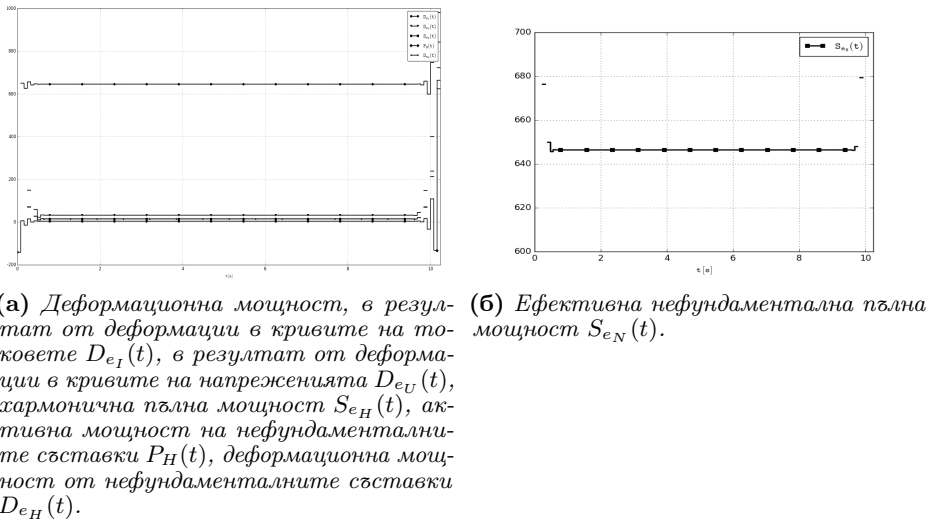
деформации в кривите на токовете $D_{e_I}(t)$, деформационна мощност в резултат от деформации в кривите на напреженията $D_{e_U}(t)$, хармонична пълна мощност $S_{e_H}(t)$, активна мощност на нефундаменталните съставки $P_H(t)$, деформационна мощност от нефундаменталните съставки $D_{e_H}(t)$ и ефективна нефундаментална пълна мощност $S_{e_N}(t)$.

На фиг. 2.13(а) са показани изчислените от разработената система за анализ коефициент на несинусоидалност за напрежението $K_{e_U}(t)$ и тока $K_{e_I}(t)$ и коефициент на общ небаланс за напрежението $K_{OH_U}(t)$ и тока $K_{OH_I}(t)$. На фиг. 2.13(б) са показани изчислените с помощта на вълничковото преобразуване ефективен фактор на мощността $PF_e(t)$ и фундаментален фактор на мощността от правата последователност $PF_f^+(t)$. Изразът за изчисляването на последната величина, според стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23] е:

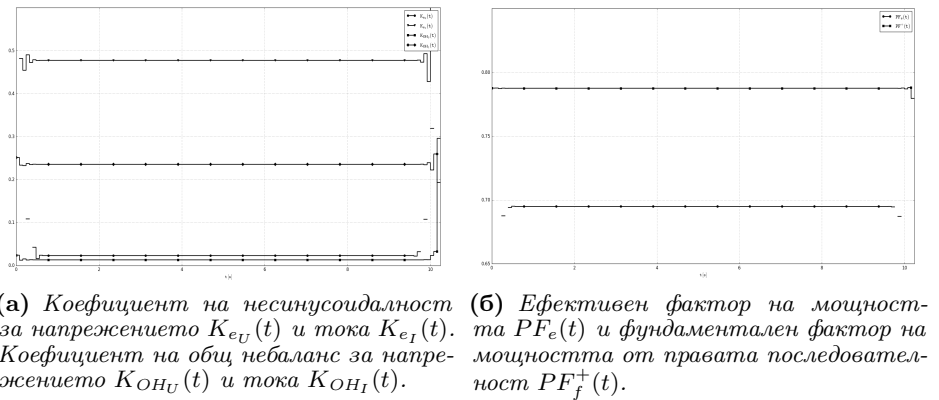
$$PF_f^+ = \frac{P_f^+}{S_f^+} \quad (4.68)$$

което е отношението на активната мощност от правата последователност от фундаменталната съставка в напреженията и токовете и пълната мощност от същите съставки.

На фиг. 2.14 е показано дървото на мощностите за трифазна система, според стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23], като към него са добавени и новопредложените величини и дефиниции [38-40].



Фигура 2.12: Нефундаментални мощности.

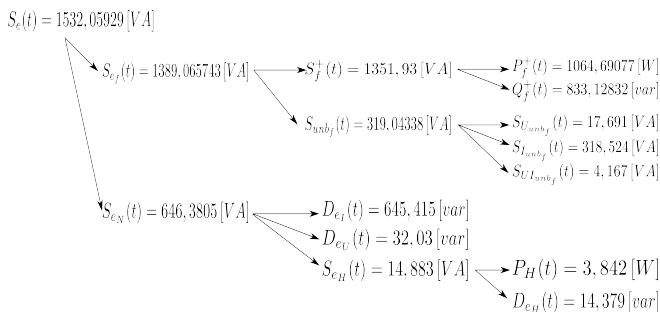


Фигура 2.13: Различни коефициенти, изчислявани от разработената система за анализ.

В таблици 2.6 и 2.7 са показани величини изчислявани от разработената система за анализ за трифазна система. В таблица 2.7 редът 38 се отнася за величината коефициент за замърсяване от хармоници - $\frac{S_{e_N}}{S_{e_f}}$, редът 39 се отнася за коефициента на несиметрия на товара - $\frac{S_{неб.f}}{S_f^+}$ [23]. В тези таблици

Таблица 2.6: Величини изчислявани от разработената система за анализ - точната им стойност, изчислената стойност и грешката между двете, за трифазна система.

| № | Величина | Точна стойност | Изчислена стойност | Грешка [%] |
|----|-----------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | U_e [V] | 127, 1934 | 127, 1934 | -8.10^{-14} |
| 2 | U_{e_f} [V] | 127, 159683 | 127, 1596 | -6.10^{-5} |
| 3 | U_{e_H} [V] | 2, 92898 | 2, 9323 | 0, 113 |
| 4 | I_e [A] | 4, 015038 | 4, 015 | $1, 1.10^{-13}$ |
| 5 | I_{e_f} [A] | 3, 64126 | 3, 6412 | -0, 0027 |
| 6 | I_{e_H} [A] | 1, 69167 | 1, 6919 | 0, 0124 |
| 7 | U^0 [V] | $1, 45 e^{j149,36}$ | $1, 44855 e^{j149,3777}$ | -0, 08; 0, 014 |
| 8 | U^+ [V] | $127, 15 e^{-j0,028}$ | $127, 14872 e^{-j0,02777}$ | -5.10^{-5} ; -1, 6796 |
| 9 | U^- [V] | $0, 82 e^{-j124,31}$ | $0, 818671 e^{-j124,3084}$ | -0, 0043; -0, 0049 |
| 10 | I^0 [A] | $0, 55 e^{j2,71}$ | $0, 5487 e^{j2,6248}$ | -0, 067; -3, 13 |
| 11 | I^+ [A] | $3, 54 e^{-j38,07}$ | $3, 544 e^{-j38,0712}$ | -0, 0012; -0, 0015 |
| 12 | I^- [A] | $0, 63 e^{-j0,5}$ | $0, 6291 e^{-j0,4994}$ | -0, 00075; -0, 157 |
| 13 | $U_{неб.f}$ [V] | 1, 66488 | 1, 66389 | -0, 0598 |
| 14 | $I_{неб.f}$ [A] | 0, 83504 | 0, 8348 | -0, 029 |
| 15 | P [W] | 1065, 679 | 1065, 679 | $-7, 5.10^{-13}$ |
| 16 | P_f^+ [W] | 1064, 70245 | 1064, 69077 | -0, 0011 |
| 17 | P_H [W] | 3, 8312 | 3, 842 | 0, 29 |
| 18 | Q_f^+ [var] | 833, 14084 | 833, 12832 | -0, 0015 |



Фигура 2.14: Дърво на мощностите за трифазна система, според нововъденията към стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23; 38].

са показани точните стойности на тридесет и девет величини, тяхната изчислена стойност и грешката между двете. На основание на резултатите от този пример, може да се твърди, че разработената система за анализ, която използва представянето на входните величини напрежение и ток чрез дискретното пакетно вълничково преобразуване (право и обратно), работи точно при установени периодични процеси, при нелинейни товари и несиметрични и несинусоидални напрежения и токове съдържащи произволни дискретни висши хармоници. Трябва обаче да се каже, че използвания вълничков фил-

Таблица 2.7: Величини изчислявани от разработената система за анализ - точната им стойност, изчислената стойност и грешката между двете, за трифазна система (продължение).

| № | Величина | Точна стойност | Изчислена стойност | Грешка [%] |
|----|---------------------------|----------------|--------------------|----------------------|
| 19 | S_e [VA] | 1532,05929 | 1532,05929 | $1,8 \cdot 10^{-13}$ |
| 20 | S_{e_f} [VA] | 1389,065743 | 1389,065743 | -0,0027 |
| 21 | S_f^+ [VA] | 1351,93 | 1351,93 | -0,00125 |
| 22 | $S_{неб.f}$ [VA] | 319,04338 | 319,04338 | -0,029 |
| 23 | $S_{U_{неб.f}}$ [VA] | 17,702 | 17,691 | -0,061 |
| 24 | $S_{I_{неб.f}}$ [VA] | 318,525 | 318,524 | $-5 \cdot 10^{-5}$ |
| 25 | $S_{UI_{неб.f}}$ [VA] | 4,17 | 4,167 | -0,089 |
| 26 | S_{e_H} [VA] | 14,865 | 14,883 | 0,126 |
| 27 | S_{e_N} [VA] | 646,2987 | 646,3805 | 0,013 |
| 28 | N [var] | 1100,696987 | 1100,696987 | 10^{-12} |
| 29 | D_{e_U} [var] | 31,9955 | 32,03 | 0,11 |
| 30 | D_{e_I} [var] | 645,335 | 645,415 | 0,012 |
| 31 | D_{e_H} [var] | 14,362 | 14,379 | 0,114 |
| 32 | K_{e_U} [-] | 0,023 | 0,023 | 0,11 |
| 33 | K_{e_I} [-] | 0,4773 | 0,4774 | 0,014 |
| 34 | K_{OH_U} [-] | 0,01309 | 0,013086 | -0,0598 |
| 35 | K_{OH_I} [-] | 0,2356 | 0,2355 | -0,028 |
| 36 | PF_e [-] | 0,69494859 | 0,69494097 | -0,001 |
| 37 | PF_f^+ [-] | 0,7875425 | 0,7875437 | 0,00015 |
| 38 | $\frac{S_{e_N}}{S_{e_f}}$ | 0,46528 | 0,46535 | 0,015 |
| 39 | $\frac{S_{неб.f}}{S_f^+}$ | 0,236 | 0,23592 | -0,028 |

тър тип симлет, дава като резултат в началото и края на изчисляваните величини недопустимо големи грешки дължащи се на голямата дължина на филтъра. Тази особеност на вълничковите филтри различни от типа „Naar”, трябва задължително да се взема под внимание при интерпретацията на резултатите.

4.4 Изводи към Четвърта глава.

1. В първата част на тази глава е разгледана темата за практическото използване на вълничковото преобразуване. Засегнат е въпроса, че разработените комерсиални софтуерни пакети [43] за вълничково преобразуване, както и софтуерните пакети с отворен код [29], не запазват нормата на сигнала при правото вълничково преобразуване. Тъй като за работата на разработената в тази глава система за анализ, това е от ключово значение, са взети мерки за отстраняване на допълнителните коефициенти в правото вълничково преобразуване, по такъв начин, че нормата на сигнала от коефициентите на преобразуването да се запази.
2. Разработен е практически алгоритъм за настройка на вълничковото

преобразуване - избор на честота на дискретизация, дълбочина на вълничковото дърво, честотни ленти на пропускане на възлите от вълничковото дърво, необходима дължина на извадката и др.

3. Представен е числен експеримент с предложеното в трета глава моделиране на изследваните величини, чрез вълнички. От резултатите се вижда, че предложения модел описва точно изследваните величини, като дава възможност за диференциране на различни съставки във изследваната величина, и особено на извличането на фундаменталната съставка.
4. По нататък в главата е показана разработената система за анализ в еднофазна система, чрез блокови схеми, показващи конкретното изчисляване на различни величини (напрежение, ток, мощности и др.), чрез моделирането на величините с вълнички. Разработената система за анализ има възможност за изчисляването на около 38 величини в еднофазна система, според използвания стандарт IEEE Std. 1459-2010 [23].
5. Възприет е подход за определянето на загубите на активна мощност, като разлика от активната мощност изчислена на клемите на източника и активната мощност изчислена на клемите на потребителя. Чрез конкретни математически изрази е показано, че тези загуби могат да се определят по този начин.
6. Представени са два числени експеримента с разработената система за анализ, в еднофазна система. Чрез първия пример е показана способността на разработената система да обработва несинусоидални изходни величини (напрежение и ток). Резултатите са проверени със съответните резултати от същия пример, даден като приложение в стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23]. Анализа на получените грешки (спрямо примера в стандарта), показва, че разработената система работи с минимални грешки. Предимство на разработената система е това, че позволява представянето на изследваните величини във време - честотната плоскост. Това позволява качествено изследване на протичащите процеси на едно ново ниво. Тази възможност е предоставена от моделирането на изходните величини, чрез вълнички.
7. Представена е визуализация на протичащия ток, като функция на причината за протичането на тока - напрежението, и параметрите на физическата среда в която токът протича. Тъй като това е функция от моментните стойности на напрежението и времето, в три измерения, то това позволява проследяването на всички протичащи в реално време процеси водещи до промяната на тока. Освен това кривата позволява качествено определяне на това дали изследваната система притежава

инертност - съдържа индуктивност и/или капацитет, а също така дали системата е линейна или нелинейна. Показано е, че проекцията на триизмерната крива в различни плоскости, изобразява кривата на напрежението във функция от времето, в единия случай и кривата на тока във функция от времето, в другия. С други думи триизмерната крива съдържа в себе си цялата необходима информация.

8. Вторият числен експеримент в еднофазна система е при синусоидално напрежение и линеен активно - индуктивен товар. Целта на този пример е да покаже работоспособността на разработената система за анализ на загубите на мощност и електроенергия, при анализа на същите при преходен режим, оценка на загубите на електроенергия при преходен процес в една пасивна еднофазна линейна верига. Осъществен е метод за намаляване на загубите на електроенергия в резултат от преходния процес, който се базира на определяне на момента на включване на активно - индуктивния товар. Тези възможности на разработената система се дължат на използването на вълничковото преобразуване, което притежава способността за време - честотен анализ. За отбелязване е, че анализа на преходни процеси с помощта на серията на Фурие (бързото преобразуване на Фурие) е теоретично невъзможно. В този пример е показано също така практическото извличане на преходната съставка на тока, чрез вълничково преобразуване.
9. Третия числен експеримент е пример за работоспособността на разработената система за анализ в трифазна система. Изчисляваните от разработената система величини, са според последните критики и нововъведения към използвания стандарт. Входните величини за посочения пример, са взети от реално проведен експеримент, както са публикувани в [38]. Анализът на грешките е направен спрямо публикуваните резултати. От този анализ се вижда, че разработената система е напълно работоспособна и в многофазна система.
10. Системата за анализ представена тук, е разработена изцяло с помощта на езика за програмиране от високо ниво Python, който е с отворен код. Използвания в тази дисертация софтуер за провеждане на числени експерименти, също е с отворен код, а именно OpenModelica [41].

5 Основни изводи и предложения за практиката. Приноси по дисертационния труд:

5.1 Научни приноси.

1. Представен е теоретичен модел на базата на вълничковото преобразуване за моментните стойности на напрежението и тока. От всички

възможни представяния на изследваната величина (който е много голям), е избрано и теоретично обосновано, представяне съобразено със последните теоретични разбирания за подходящото разделяне на честотните компоненти в изследваните величини.

2. Представени са теоретични изрази, чрез които от коефициентите на правото вълничково преобразуване, могат да се извлекат локализиращи ефективни стойности на изследваната величина, както във времевата, така и в честотната област. Тази ключова особеност на вълничковото преобразуване, се пропуска, или не се показва от повечето съвременни изследвания в областта.

5.2 Научно - приложни приноси.

1. Върху основата на посочените теоретични приноси е разработена система за анализ. В разработената система, всички определения дадени в стандарта IEEE Std. 1459-2010 [23] и последните надграждания върху него [38 - 40], са предефинирани чрез моделирането на изходните величини с помощта на вълничковото преобразуване. В резултат на това могат да се проследят локалните изменения, или особености на изследваните величини.
2. Разработената система за анализ има възможност за представянето на изследваните величини, в честотно - времевата плоскост. Представянето може да бъде както двуизмерно, така и триизмерно. В резултат на това може да се проведе качествено изследване на локалните изменения на изследваната величина и измененията на съставките ѝ във времето.
3. Разработената система за анализ има възможност за триизмерното представяне на тока, като резултат от приложено въздействие - напрежението и електромагнитните свойства на средата в която той се разпространява. В резултат на това може да се проведе качествено изследване на моментните изменения на тока, както и може да се съди за електромагнитните свойства на средата в която той се разпространява. Триизмерното представяне на тока по този начин също така дава възможност за определянето на характера на товара - линеен, или нелинеен.
4. Представен е алгоритъм за намаляването на загубите на активна мощност в хранващите линии, по време на преходния процес, в еднофазни системи.
5. Разработената система за анализ има възможност да изчислява необходимия компенсиращ ток, така че, ако този ток се инжектира чрез

активен филтър, да се получи компенсация на всички неактивни съставки в черпения от източника ток. В резултат, пълния ток, който се черпи от източника е синусоидален и във фаза с напрежението. По този начин се намаляват загубите на мощност и електроенергия от неактивните съставки на пълния ток. Тази възможност е осигурена от определенията на теорията за обобщената неактивна мощност. Всички определения на тази теория също са предефинирани чрез представеното вълничково моделиране.

5.3 Приложни приноси.

1. Разработен е софтуер, който имплементира блоковата схема на разработената система за анализ. Входни величини на разработения софтуер са моментните стойности на напреженията и токовете, както и параметрите на вълничковото преобразуване. С помощта на това програмно обезпечение, могат направо да се обработват сметите от съвременните цифрови системи за сваляне на данни, напрежения и токове.

6 Публикации по дисертационния труд.

1. *Румен Киров, Валентин Гюров, Владимир Чиков, Никола Македонски* „Оптимизирани отраслови изисквания за електроенергийна ефективност по критерий $\Delta P^* < 0$.”, III Научна конференция - ЕФ 2011, Созопол, България, 30 септември - 3 октомври 2011, том I, стр.261 - 266
2. *Румен Киров, Никола Македонски, Владимир Чиков, Валентин Гюров* „Технико - икономически критерий за оценка на електроенергийната ефективност при компенсация на реактивните товари в отраслите на промишлеността.”, III Научна конференция - ЕФ 2011, Созопол, България, 30 септември - 3 октомври 2011, том I, стр.273 - 280
3. *Киров Р. М., Гюров В. Н., Чиков В. Ч., Македонски Н. И.* „Относно възможностите за постигане на оптимална компенсация на реактивните товари в промишлени обекти при съвременните условия на експлоатация на ЕСС.”, XIII International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2011, Varna, Bulgaria, October 2011, ISSN 1313-4965, стр.211 - 214
4. *Kirov Rumen, Gyurov Valentin, Makedonski Nikola, Stefanov Stoimen* „Study on power and energy losses for different branches of industry in Republic of Bulgaria.”, 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering - ELEKTROENERGETIKA 2013, Stará Lesná, Slovak Republic, 18 - 20 September 2013, ISBN 978-80-553-1441-9, pp.121 - 124

5. *Makedonski Nikola, Kirov Rumén, Gyurov Valentin, Chikov Vladimir*

„Application of GINAPT for analyse on power delivery of linear and non-linear loads.”, 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering - ELEKTROENERGETIKA 2013, Stará Lesná, Slovak Republic, 18 - 20 September 2013, ISBN 978-80-553-1441-9, pp.292 - 295

6. *Rumen Kirov, Vladimir Chikov, Nikola Makedonski, Ginka Ivanova, Plian Iliev* „Study of the contents and the share of abnormal harmonics, due to work of power converters.”, XIV International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2015, Varna, Bulgaria, October 2015, ISSN 1313-4965, pp.189 - 191

7. *Македонски Н. И.* „Моделиране на напрежението и тока в електроснабдителните системи на промишлените предприятия с помощта на пакетното вълничково преобразуване.”, International Scientific Conference, Gabrovo, Bulgaria, 18-19.November.2016, Vol. I, стр.106 - 111

7 Благодарности.

Извазвам най-искрени благодарности към:

- научния ми ръководител доц. д-р инж. Румен Киров, за търпението и напътствията;
- доц. д-р инж. Валентин Гюров, който ми показва как да се ориентирам в трудните за разбиране теоретични постановки и особено за плодотворния му скептицизъм;
- доц. д-р инж. Владимир Чиков, който ме въведе и разкри пред мен чудния свят на електрониката;
- доц. д-р инж. Пламен Парушев, който с прости думи обяснява сложни проблеми и който ме насочваше и напътстваше по проблемите на организацията на работата по тази дисертация;
- доц. д-р инж. Петко Петков, който като човек с дълбоки теоретични познания и голям практически опит винаги ми е помагал, когато съм се обръщал с някакъв въпрос към него;
- ас. д-р инж. Димитър Димитров, който преди мен извървя до край бодливия път на докторант и от тази позиция ми даваше ценни съвети;
- ас. инж. Гинка Иванова, която е пример за целеустременост и преодоляване на пречки, и която ми разкри практическата работа по корабите;

- ас. инж. Христиан Панчев, който с младежката си енергия и работата, която извършва в катедрата е пример за мен.

Освен това искам да благодаря специално на моето семейство: съпругата ми Красимира, за това, че ми беше опора в трудните моменти през изминалите години и относително търпеливо изчака завършването на дисертацията, и на дъщеричката ми Мария, която се роди по време на докторантурата и внесе много радост и щастие в нашето семейство.

Изказвам моята най-дълбока благодарност на родителите ми Дарина и Иван Македонски за възпитанието и морала, които са ми дали, за образованието, което семейството ми осигури и за тяхната неспираща морална подкрепа.

Изказвам моята най-дълбока благодарност и на сестра ми Соня Македонска, която винаги ми е помагала и е до мен в добри и лоши моменти.

Искам да благодаря и на всички мои близки и приятели, които не спираха да вярват в мен, да ме подкрепят и неотлъчно бяха с мен в трудните моменти.