

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТЕПУРА ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. В. Степура

Науковий керівник:

Бурбело Михайло Йосипович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2019

АНОТАЦІЯ

Степура О. В. Виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

У дисертаційній роботі поставлена й вирішена актуальна задача підвищення чутливості виявлення джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні процесу виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах шляхом використання умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано інформативні величини для оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих мережах з використанням узагальнених миттєвих симетричних складових зворотної та нульової послідовностей, що забезпечує виділення спотворень, які зумовлені канонічними гармоніками, а також гармоніками, що кратні трьом.

2. Удосконалено метод виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії, що оснований на використанні умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей, який забезпечує можливість кількісного оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

3. Дістав подальшого розвитку метод аналізу чутливості виявлення

впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в мережах з ізольованою та заземленою нейтраллю за наявності гармонік, як відношення приросту умовної потужності зворотної та нульової послідовностей до приросту потужності гармонічної складової, що викликає цей вид спотворення. Це дало змогу оцінювання можливості виявлення нелінійних споживачів за наявності сторонніх гармонічних спотворень.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у розробці АСКОВЕ з виявленням та оцінюванням впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії. Їх впровадження сприятиме покращенню якості електроенергії, зокрема зменшенню несинусоїдності та несиметрії напруги в розподільчих мережах.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що основними методами виявлення джерел спотворень на теперішній час є одноточкові методи визначення дольового внеску та методи балансу потужностей.

Метод дольового внеску, що оснований на проведенні активного експерименту з використанням увімкнення або вимкнення конденсаторної батареї, увімкнення трансформаторів на паралельну роботу, перемикання регульовального відгалуження трансформатора з регулюванням під навантаженням, регулювання активного опору ФКП, забезпечує достатню точність, однак складний в реалізації і має недостатню метрологічну надійність.

Недоліками методів балансу потужностей спотворення є те, що вони оснований на інтегральних величинах і не дозволяють забезпечити виявлення джерел спотворення (несиметрії та несинусоїдності напруг) та розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

Для розгалужених мереж з багатьма джерелами спотворення

перспективними є багатоточкові методи, що основані на статистичній обробці вимірювальної інформації. Однак такі методи вимагають розвитку технічних засобів.

Запропоновано метод виявлення впливу нелінійних несиметричних навантажень на розподільчі електричні мережі з використанням складників пульсуючої потужності.

Показано, що в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж пульсуюча потужність містить два складники, які зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів. Складники, що зумовлені несиметрією, представлено миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності. Складники потужності спотворення, що зумовлені несинусоїдністю, визначено як різницю пульсуючої потужності та миттєвої умовної потужності зворотної послідовності. Отримано вирази для визначення потужностей зворотної послідовності та спотворення в інтегральній та спектральній формах запису.

Обґрунтовано доцільність застосування системи узагальнених миттєвих симетричних складових та визначених на їх основі умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії.

Проаналізована можливість виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) на якість електроенергії трифазних мереж з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей P_{i_2}, Q_{i_2} та P_{i_0}, Q_{i_0} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм, відповідно, зворотної та нульової послідовностей. Для оцінювання вини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільчої мережі, використані миттєві умовні потужності P_{u_2}, Q_{u_2} та P_{u_0}, Q_{u_0} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу, відповідно, зворотної та нульової послідовностей.

На основі теорії миттєвої потужності проаналізовано несиметричні несинусоїдні режими трифазних мереж із заземленою нейтраллю з використанням умовних потужностей нульової послідовності q_{β} і q_{α} , які є відповідно активною та реактивною умовними потужностями нульової послідовності, містять складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються відповідно постійною та змінною складовою. Миттєві умовні потужності q_{β} і q_{α} пропонується розділити на миттєві умовні потужності $q_{\beta i_0}$, $q_{\alpha i_0}$, які визначаються струмом нульової послідовності, та миттєві умовні потужності $q_{\beta u_0}$, $q_{\alpha u_0}$, які визначаються напругою нульової послідовності.

Показано, що за наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей p_{i_2} , q_{i_2} та p_{i_0} , q_{i_0} зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності, що створюється напругою та струмом основної частоти прямої послідовності. Водночас збільшення p_{u_2} , q_{u_2} та p_{u_0} , q_{u_0} свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення нелінійних споживачів. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин.

Проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармонічного складника, який є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Показано,

що чутливість є досить високою для всіх показників. Несиметрія навантажень не знижує чутливості методу.

Використання середніх значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей дозволяє виявити споживачів, які мають несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (системи) не впливає на чутливість для споживачів з різним характером спотворень. Деяке зменшення чутливості відбувається для споживачів з однаковим характером спотворень споживача і системи, що призводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх. При цьому чутливість залишається високою ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). Показано, що метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10% і більше від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи).

Практично реалізовано АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Одержані наукові результати а саме: програмно-апаратний комплекс автоматизованої системи контролю обліку електроенергії (АСКОЕ) з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії впроваджено в ПП „Промавтоматика”, що підтверджено актом про впровадження від 07.02.2019 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 17.06.2019 р.

Ключові слова: виявлення джерел спотворення, якість електроенергії, розподільчі електричні мережі, умовні потужності зворотної та нульової послідовностей, нелінійні і несиметричні споживачі.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж,» *Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та устаткування*, № 1, с. 42-49, 2019.

[2] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 1, с. 24-30, 2019.

[3] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,» *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* *Енергетика: надійність та енергоефективність*, № 14(1339), с. 78-82, 2019.

[4] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Умовні потужності нульової послідовності за несиметричних несинусоїдних режимів трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* Вип. 38. С. 144-151. 2019.

[5] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних

потужностей,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 3, с.13-20, 2019.

[6] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та О. В. Степура, «Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів,» *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 3(271), с. 220-225, 2019.

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що не внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[7] О. В. Степура, «Приймальний контроль за кількісною ознакою з використанням економічного критерію оптимальності,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 154-156, 1998.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості методів виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії», на *Monografia pokonferencyjna. Science, Research, Development #16. Technics and technology*, Barcelona, 2019, pp. 58-67.

[9] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення нелінійних та несиметричних споживачів», на *Science, Research, Development #18 (Наука, Исследования, Развитие #18)*, Ваку/Баку, 2019, с. 13-17.

ABSTRACT

Stepura O. V. Detecting and evaluating the sources of power quality distortion in electrical distribution networks. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.14.02 «Electric power stations, networks and systems». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

This dissertation focuses on finding practical solution to the problem of increasing sensitivity to detect the sources of power quality distortion in electrical distribution networks.

Scientific novelty of the research is grounded in the fact that the process of detecting and evaluating the sources of power quality distortion in electrical distribution networks has been improved by using conditional capacities of reverse and zero sequences.

The findings of the research are as follows:

1. Informative values to evaluate the impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of electric powers in distribution networks by using generalized instant symmetrical capacities of reverse and zero sequences which provides separation of distortions caused by canonical harmonics and harmonics multiple of three have been justified.

2. Method of detecting and evaluating the impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of electric powers based on usage of conditional capacities of reverse and zero sequences which provides increasing sensitivity to detect and evaluate the impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of electric powers has been improved.

3. Method of detection sensitivity analysis of impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of power in isolated and grounded networks subject to harmonics that takes into account the ration between conditional capacities of reverse and zero sequences and capacities of harmonic component that causes this type of distortion has received further development. This made it possible to evaluate the possibility of detecting nonlinear consumers in the presence of third-party harmonic distortions.

Practical value of the research lies in developing ASCAE (automated system of commercial accounting of electricity) aimed at detecting and evaluating the impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of power. The implementation of the above mentioned system will contribute sufficiently to

improvement of power quality, namely, reducing asymmetric and non-sinusoidal power in electrical distribution networks.

On the basis of the analysis of the literature, it is established that the main methods for detecting sources of distortion are currently one-point methods for determining the contribution and the balance of power.

The method of fractional contribution, based on an active experiment using the on or off of the capacitor battery, switching on the transformers for parallel operation, switching the adjusting branch of the transformer with load regulation, regulation of active resistance of the FCP, provides sufficient accuracy and precision. reliability.

The disadvantages of the methods of balancing the power of distortion are that they are based on integral quantities and do not allow to identify sources of distortion (asymmetry and non-sinusoidal voltages) and distinguish harmonic components that cause currents of inverse and zero sequences, as well as detect non-symmetry of non-symmetry .

For branching networks with many sources of distortion, multi-point methods based on statistical processing of measurement information are promising. However, such methods require the development of technical means.

A method of detecting the influence of nonlinear asymmetrical loads on distribution electrical networks using the components of pulsating power is proposed.

It has been stated that in asymmetrical non-sinusoid modes of electric networks pulsation power contains two components, caused by asymmetry and non-sinusoidal character of voltage and current. Components caused by asymmetry are determined by instant conditional capacities of reverse sequences. Components of power detection of non-sinusoidal character are defined as difference between pulsating capacities and instant conditional capacities of reverse sequences. Indicators to determine capacities of reverse sequence and detection in integral and spectral forms of recording have been obtained.

Applicability of system of generalized instant symmetric components and conditional capacities of reverse and zero sequences based on them, which are aimed at detecting customers distorting the power quality, has been justified.

The possibility of detecting and evaluating the impact of distortion sources (asymmetry and higher harmonics) on the quality of power in three-phase networks by using instant conditional capacities of reverse sequence p_{i_2}, q_{i_2} which are results of instant voltage of forward sequence multiplied by current of reverse sequence has been analyzed. The same method has been applied to define the fault of a power supplier for inefficient building of distribution networks has been applied, in particular, instant conditional capacities p_{u_2}, q_{u_2} which are results of instant current of forward sequence multiplied by voltage of reverse sequence.

Asymmetrical non-sinusoidal modes of three-phase networks with grounded neutral have been analyzed based on the theory of instant capacity. It has also been stated that conditional capacities of zero sequence q_{β} and q_{α} , being active and reactive conditional capacities of zero sequence respectively, contain components which are caused by asymmetrical and non-sinusoidal nature, with constant and variable components respectively.

It has been suggested that instant conditional capacities q_{β} and q_{α} should be divided into conditional capacities $q_{\beta i_0}, q_{\alpha i_0}$ defined by current of zero sequence, and instant conditional capacities $q_{\beta u_0}, q_{\alpha u_0}$ defined by voltage of zero sequence.

It has been claimed that if harmonic distortions are available the RMS values of conditional capacities p_{i_2}, q_{i_2} and p_{i_0}, q_{i_0} increase and make up one to ten percent relative to the main power, created by voltage and current of main frequency of forward sequence. At the same time an increase of p_{u_2}, q_{u_2} and p_{u_0}, q_{u_0} proves insufficient output of power transformers and inappropriate usage

of transformers with the following scheme of transformer connection: «star/star with zero». In case there is asymmetry of load average figures increase.

Sensitivity of detection of nonlinear customers who distort power quality has been analyzed by means of method of conditional capacities which is based on the usage of the RSM values of conditional capacities of reverse and zero sequences. To evaluate sensitivity it is suggested that the ratio of the RSM values of conditional active and reactive capacities of reverse and zero sequences to the value of full capacity of harmonic component should be used. It has been also discovered that sensitivity is high enough for all indicators. Asymmetry of load does not reduce the sensitivity of this method.

Usage of average figures of conditional capacities of reverse and zero sequences helps define customers who have asymmetry of load according to reverse and zero sequences.

Increasing the content of outside customers (of the system) does not impact on sensitivity of the customers with different type of distortions. Some decrease of sensitivity happens to the customers with the same type of distortions of a customer and of a system, which causes overlapping harmonic currents of a system with customer's currents enhancing or weakening them.

In such a case sensitivity remains high ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). It has been stated that method of conditional capacities of reverse and zero sequences provides reliable detection of customers, whose distortion current makes up 10% and more of the total distortion current from all customers (of a system).

ASCAE (automated system of commercial accounting of electricity) with the function to detect and evaluate the impact of nonlinear and asymmetric consumers on distortion the quality of electric power has been developed and practically implemented.

The results obtained in the course of the research, in particular, software and hardware complex for a system of commercial accounting of electricity (ASCAE) with the function to detect and evaluate the impact of nonlinear and asymmetric

consumers on distortion the quality of electric power have been successfully implemented in private enterprise "Promavtomatika" confirmed by the act of implementation from 07.02.2019. The results of the research are also used at Vinnytsia National Technical University at the department of electrical engineering systems of power consumption and energy management to provide professional training of specialists to get the specialty 141 – “Electricity, electrical engineering and electromechanics”, certificate about implementation issued from 17.06.2019.

Key words: detecting the sources of distortion, quality of electricity, electrical distribution networks, conditional capacities of reverse and zero sequences, nonlinear and asymmetric consumers.

LIST OF PUBLICATIONS

Research papers where the basic findings of the research have been published:

Papers in scientific specialised issues of Ukraine:

[1] M. Y. Burbelo, A. V. Gadai, and O. V. Stepura, «Determination of pulsating power in asymmetric non-sinusoidal modes of electric networks,» *Technical electrodynamics. Power systems and equipment*, no. 1, pp. 42-49, 2019

[2] M. Y. Burbelo, and O. V. Stepura «Estimation of the nonlinear asymmetric loads influence on low-voltage electrical networks,» *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute. Power engineering, electrical engineering and electromechanics*, no. 1, pp. 24-30, 2019.

[3] M. Y. Burbelo, and O. V. Stepura «Application of generalized symmetric components for the identification of consumers that distort electricity quality,» *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Energy: reliability and energy efficiency*, no. 14(1339), pp. 78-82, 2019.

[4] M. Y. Burbelo, A. V. Gadai, and O. V. Stepura, «Conductivity power of zero sequence for asymmetrical non-sinusoidal modes of three-phase electrical grounded neutral systems,» *Visnyk of the Priazov State Technical University. Engineering sciences*. № 38. pp. 144-151. 2019.

[5] M. Y. Burbelo, and O. V. Stepura, «Sensitivity Analysis of Consumers Disturbing Detection of Electricity Quality by the Method of Conditional Capacity,» *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute. Power engineering, electrical engineering and electromechanics*, no. 3, pp. 13–20, 2019.

[6] M. Y. Burbelo, Yu. V. Loboda, and O. V. Stepura, «Analysis of Dynamic Errors of Distributive STAS Due to Inaccuracy in the Formation of Satisfactory Currents,» *Bulletin of Khmelnytsky National University. Engineering sciences*, no. 3(271), pp. 220-225, 2019.

[7] O. V. Stepura, «Acceptance control of quantitative trait using economic criterion optimality,» *Measuring and computing technology in technological processes*, no. 2, pp. 154-156, 1998.

Scientific papers highlighting the approbation of thesis materials:

[8] M. Y. Burbelo, L. M. Melnychuk, and O. V. Stepura, «Sensitivity analysis of methods of consumers detection that distort electricity quality», *Monografia pokonferencyjna. Science, Research, Development #16. Technics and technology*, Barcelona, 2019, pp. 58-67.

[9] M. Y. Burbelo, L. M. Melnychuk, and O. V. Stepura, «Application of Generalized Symmetric Components for the Detection of Nonlinear and Asymmetric Consumers», *Science, Research, Development #18*, Baku, 2019, pp. 13-17.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП	18
1 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СПОЖИВАЧІВ НА ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	24
1.1 Метод дольового внеску споживачів в спотворення напруги.....	24
1.2 Методи, що основані на використанні балансу потужностей.....	32
1.3 Багатоточкові методи визначення фактичних внесків споживачів в погіршення якості електроенергії.....	39
1.4 Висновки та основні задачі дослідження	44
2 ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛАДНИКІВ ПУЛЬСУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ	46
2.1 Активна та реактивна потужності в несинусоїдних несиметричних режимах електричних мереж	46
2.2 Пульсуючі потужності та умовні потужності зворотної послідовності ...	52
2.3 Визначення складників пульсуючої потужності в спектральній формі....	56
2.4 Виявлення джерел спотворень в розподільчих мережах за складниками пульсуючої потужності.....	60
2.5 Висновки до розділу 2	68
3 ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МИТТЄВИХ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ	69
3.1 Миттєві симетричні складові напруг і струмів.....	69
3.2 Виявлення джерел спотворень за наявності канонічних гармонік з використанням миттєвих симетричних складових.....	74
3.3 Виявлення джерел спотворень в мережах із заземленою нейтраллю за наявності гармонік, що кратні трьом	81

3.4 Дослідження впливу опору системи (потужності і схеми сполучення обмоток силового трансформатора).....	90
3.5 Висновки до розділу 3	92
4 АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ	95
4.1 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням реактивної потужності	95
4.2 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням потужностей спотворень	98
4.3 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей струмів і напруг	100
4.4 Висновки до розділу 4	107
5 РОЗРОБКА АСКОЕ З ФУНКЦІЄЮ ВИЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	109
5.1 Структурна схема АСКОЕ з виявленням споживачів, які спотворюють якість електроенергії.....	109
5.2 Вимірювання умовних потужностей зворотної послідовності в динамічних режимах	114
5.3 Статистичний контроль якості електроенергії з використанням економічного критерію оптимальності.....	117
5.4 Висновки до розділу 5	122
ВИСНОВКИ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
ДОДАТКИ.....	139
Додаток А Результати впровадження дисертаційного дослідження	140
Додаток Б Програми розрахунків в пакеті Mathcad	142
Додаток В Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун;
- АРМ – автоматизоване робоче місце;
- АСКОЕ – автоматизована система контролю та обліку електроспоживання;
- ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;
- ГС – гармонічна складова;
- ДВ – дольовий внесок;
- ЕЕС – електроенергетична система;
- ЕЗ – елемент затримки в часі;
- КК – комутатор каналів (каналів опитування точок обліку споживачів);
- МК – мікроконтролер;
- ПЗПД – підсистема зберігання та передачі даних;
- ПН – перетворювач напруг;
- ПС – перетворювач струмів;
- ПП – перетворювач потужності;
- ППР – підсистема прийняття рішень щодо спотворення ЯЕ;
- СП – силові перетворювачі;
- СС – симетрична складова;
- ТН – трансформатор напруги;
- ТС – трансформатор струму;
- ТЗП – точка загального приєднання;
- ФКП – фільтрокомпенсувальний пристрій;
- ЯЕ – якість електроенергії;
- Σ – суматор;
- GPRS – модем стандарту GSM/GPRS.
- HSE – оцінка гармонічного стану (harmonic state estimation);
- RTU-325 – пристрій збору та передачі даних;
- SVD – сингулярне розкладання (singular value decomposition).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Особливої актуальності в останні роки набула проблема виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих електричних мережах. Нелінійні та несиметричні навантаження є джерелами струмів вищих гармонік і струмів трифазних симетричних складових зворотної та нульової послідовностей, які знижують якість електричної енергії, збільшують її втрати.

В [1] рекомендовано метод визначення відповідальності споживача, що погіршує якість електроенергії (ЯЕ), і оцінювання його внеску в погіршення показника ЯЕ, згідно з яким порівнюють значення показників ЯЕ при вимкненому та увімкненому споживачі, що дозволяє виявити джерело спотворення і його внесок в спотворення в певний момент часу. Недоліком є те, що фіксують показники ЯЕ до приєднання споживача, які в подальшому вважають незмінними, а зміни параметрів ЯЕ після приєднання споживача пояснюють впливом лише останнього приєданого споживача, що не завжди відповідає дійсності.

Для експериментального визначення відповідальності споживача за погіршення ЯЕ без його вимкнення запропоновано метод з використанням дольового внеску споживачів в спотворення напруги [2]-[9]. В [10]-[13] для експериментального визначення дольового внеску використано активний експеримент. Однак ці методи є достатньо складними в реалізації. В [14]-[17] обґрунтовано метод оцінювання впливу навантажень споживача на рівень напруги n -ї ГС, що володіє властивістю автономності.

В [18], [19] запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для s -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та n -ї гармонічної складової (ГС). Цей метод був проаналізований і доповнений в [20]-[31]. Група експериментальних методів оснований на використанні інтегральних потужностей, які враховують

одночасно всі гармонічні складники струмів і напруг [32]-[36]. В [37]-[39] запропоновано використовувати напрямки і значення умовних потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм n -ї ГС.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області виявлення джерел гармонік, існують певні побоювання з точки зору ідентифікації джерел динамічних гармонік та можливості адаптації методів до постійно мінливих навантажень в розподільчих мережах.

Тому науково-прикладне завдання, яке полягає у вдосконаленні процесу виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії, є актуальним.

Дисертаційне дослідження спрямоване на підвищення чутливості виявлення впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках науково-дослідної роботи № 22 К „Розробка методів та пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності”. Автор брав участь у виконанні науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення чутливості виявлення джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати методи виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії та систематизувати відомі теоретичні підходи;

2. Розробити методи виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в мережах з ізольованою та заземленою нейтраллю за наявності канонічних гармонік та за наявності гармонік, що кратні трьом;

3. Проаналізувати чутливість методів виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих мережах;

4. Практично реалізувати АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Об'єкт дослідження. Процес виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Предмет дослідження. Методи підвищення чутливості виявлення впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Методи дослідження. Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії електротехніки – при отриманні аналітичних виразів методів виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в мережах; на теорії математичної статистики – при проведенні статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні процесу виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах шляхом використання умовних потужностей зворотної та нульової

послідовностей.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано інформативні величини для оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих мережах з використанням узагальнених миттєвих симетричних складових зворотної та нульової послідовностей, що забезпечує виділення спотворень, які зумовлені канонічними гармоніками, а також гармоніками, що кратні трьом.

2. Удосконалено метод виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії, що оснований на використанні умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей, який забезпечує можливість кількісного оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

3. Дістав подальшого розвитку метод аналізу чутливості виявлення впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в мережах з ізольованою та заземленою нейтраллю за наявності гармонік, як відношення приросту умовної потужності зворотної та нульової послідовностей до приросту потужності гармонічної складової, що викликає цей вид спотворення. Це дало змогу оцінювання можливості виявлення нелінійних споживачів за наявності сторонніх гармонічних спотворень.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у розробці АСКОЕ з виявленням та оцінюванням впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії. Їх впровадження сприятиме покращенню якості електроенергії, зокрема зменшенню несинусоїдності та несиметрії напруги в розподільчих мережах.

Одержані наукові результати а саме: метод виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії впроваджено в ПП „Промавтоматика”, що підтверджено

актом про впровадження від 07.02.2019 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 17.06.2019 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [75] – показано, що складники пульсуючої потужності, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, характеризуються відповідно умовною потужністю зворотної послідовності та потужністю спотворення, та запропоновано вирази для цих потужностей в інтегральній та спектральній формах запису; [78] – обґрунтовано доцільність застосування системи узагальнених миттєвих симетричних складових та визначених на їх основі умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії; [79] – виконано порівняння двох лінійних перетворень миттєвих напруг і струмів з системи фазних координат в систему симетричних складових; [80] – обґрунтовано інформативні величини для виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей; [84] – запропоновано миттєві умовні потужності нульової послідовності розділити на миттєві умовні потужності, які пропорційні струму нульової послідовності, та миттєві умовні потужності, які пропорційні напрузі нульової послідовності; [85] – проаналізовано чутливість виявлення споживачів, які погіршують якість електроенергії, різними методами і показано, що найбільш чутливим є метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей; [86] – запропоновано для оцінювання чутливості використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової

послідовностей до значення повної потужності гармонічного складника, який є основою для формування струмів відповідних послідовностей; [93] – запропоновано спосіб зменшення похибок вимірювання потужностей в динамічних режимах навантажень; [95] – запропоновано застосування економічного критерію оптимальності в процесі контролю. Результати теоретичних досліджень були отримані у Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ).

Апробація матеріалів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: «Science, Research, Development. Technics and technology», Barcelona, 2019, «*SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT* #18». Баку. 2019.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 9 наукових працях, в тому числі в 6 статтях в наукових фахових виданнях України (з них одна – у SCOPUS), 1 – у виданні, що не внесене до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук, 2 – у матеріалах іноземних конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 167 сторінок, з яких основний зміст викладений на 109 сторінках друкованого тексту, містить 38 рисунків, 18 таблиць. Список використаних джерел складається з 101 найменування. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, програми розрахунків, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СПОЖИВАЧІВ НА ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Метод дольового внеску споживачів в спотворення напруги

Найбільш поширеним для оцінки впливу джерел вищих гармонік та несиметричних навантажень на погіршення ЯЕ є метод з використанням дольового внеску споживачів в спотворення напруги [2]-[8].

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.1). На схемі позначено: $\dot{I}_{(n)m}$ – комплексний струм спотворення n -ї ГС для m -го приєднання; $\underline{Z}_{(n)m}$ – комплексний опір навантаження на n -ій ГС для m -го приєднання; $\underline{Z}_{(n)T}$ – комплексний опір трансформатора на n -ій ГС. Опір трансформатора визначається з урахуванням того, що струми 4, 7, ..., 2, 5, ... гармонік утворюють відповідно пряму та зворотну послідовність, а струми 3, 6, ... гармонік – нульову послідовність. В опорі трансформатора за необхідності можна врахувати опір лінії прямої та зворотної послідовності.

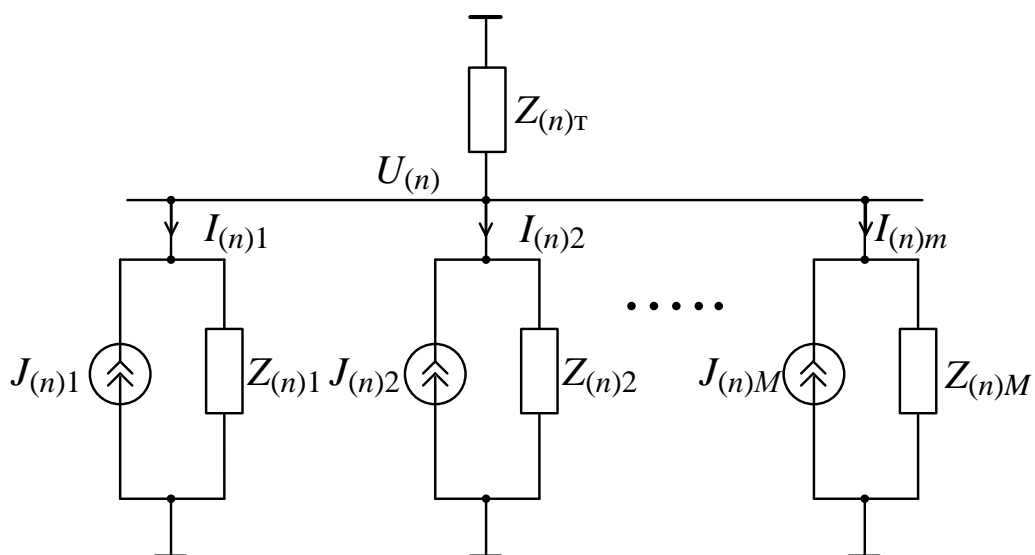


Рисунок 1.1 – Повна схема заміщення вузла мережі для n -ї ГС

Комплексна напруга n -ї гармонічної складової (ГС) або s -ї симетричної складової (СС) в точці загального приєднання (ТЗП) визначається такими виразами [2]:

$$\dot{U}_{(n)} = \sum_{m=1}^M \dot{J}_{(n)m} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{n(m)} ; \dot{U}_{(s)} = \sum_{m=1}^M \dot{J}_{(s)m} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(s)m} , \quad (1.1)$$

де $\dot{J}_{(n)m}$ – комплексний струм спотворення n -ї ГС для m -го приєднання; $\underline{Y}_{(n)m}$ – комплексна провідність навантаження на n -ій ГС для m -го приєднання ($\underline{Y}_{(n)m} = 1/\underline{Z}_{(n)m}$); $\dot{J}_{(s)m}$ – комплексний струм s -ї СС для m -го приєднання; $\underline{Y}_{(s)m}$ – комплексна провідність навантаження на s -ій СС для m -го приєднання; M – кількість приєднань у вузлі мережі.

Дольовий внесок (ДВ) від джерел гармонічних складових струму або джерел струму зворотної та нульової послідовностей визначають як модуль вектора напруги n -ї гармоніки або модуль вектора напруги зворотної та нульової послідовності, що створює певний суб'єкт в ТЗП. ДВ k -го приєднання в рівень n -ї гармонічної складової (ГС) або s -ї симетричної складової (СС) у вузлі мережі визначається за виразом:

$$\dot{U}_{(n)k}^{ДВ} = \dot{J}_{(n)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(n)m} ; \dot{U}_{(s)k}^{ДВ} = \dot{J}_{(s)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(s)m} , \quad (1.2)$$

де $\dot{J}_{(n)k}$ – комплексний струм n -ї ГС для k -го приєднання; $\dot{J}_{(s)k}$ – комплексний струм s -ї СС для k -го приєднання.

Відносно будь-якого споживача схему заміщення можна спростити (рис. 1.2). Джерело спотворення споживача подано джерелом струму навантаження $J_{(n)n}$, а решти споживачів – джерелом системи $J_{(n)c}$. Опори навантаження споживача і системи позначено $\underline{Z}_{(n)n}$, $\underline{Z}_{(n)c}$. Опір $\underline{Z}_{(n)c}$

визначається як результат паралельного увімкнення опору трансформатора і опорів навантаження решти споживачів.

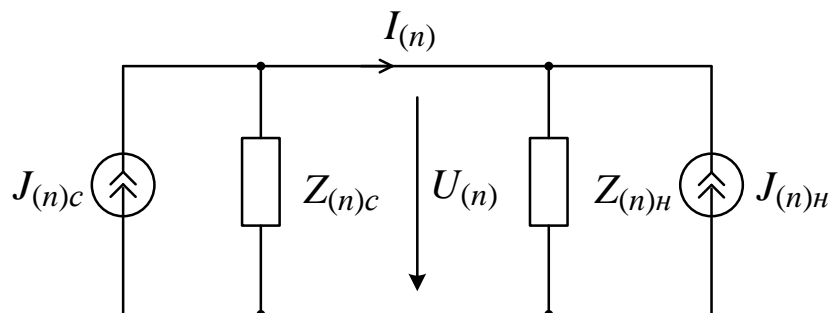


Рисунок 1.2 – Спрощена схеми заміщення вузла мережі для n -ї ГС

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.2). Напряга n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює сумі дольових внесків системи і навантаження

$$\dot{U}_{(n)} = \dot{U}_{(n)c}^{ДВ} + \dot{U}_{(n)n}^{ДВ} = \dot{J}_{(n)c} \frac{\underline{Z}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)n} + \underline{Z}_{(n)c}} + \dot{J}_{(n)n} \frac{\underline{Z}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)n} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.3)$$

Струм n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює різниці фактичних внесків системи і навантаження

$$\dot{I}_{(n)} = \dot{I}_{(n)c}^{ДВ} - \dot{I}_{(n)n}^{ДВ} = \dot{J}_{(n)c} \frac{\underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)n} + \underline{Z}_{(n)c}} - \dot{J}_{(n)n} \frac{\underline{Z}_{(n)n}}{\underline{Z}_{(n)n} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.4)$$

Струми n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)n}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ невідомі. Відомими є напруга і струм n -ї ГС на межі балансової належності. Опір системи приблизно відомий. Він практично визначається опором понижувального трансформатора. Опір навантаження невідомий. Відомий лише діапазон зміни опору споживача, який залежить від складу та діапазону зміни навантаження.

Залежності діючих значень напруги і струму n -ї ГС від кута $\delta_{(n)}$ для випадку $\underline{Z}_{(n)c} = 0,002 + j0,05 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{(n)n} = 1 + j2,5 \text{ Ом}$, $\dot{J}_{(n)c} = 5e^{j0} \text{ А}$, $\dot{J}_{(n)n} = 5e^{j\delta_{(n)}} \text{ А}$ зображено на рис. 1.3.

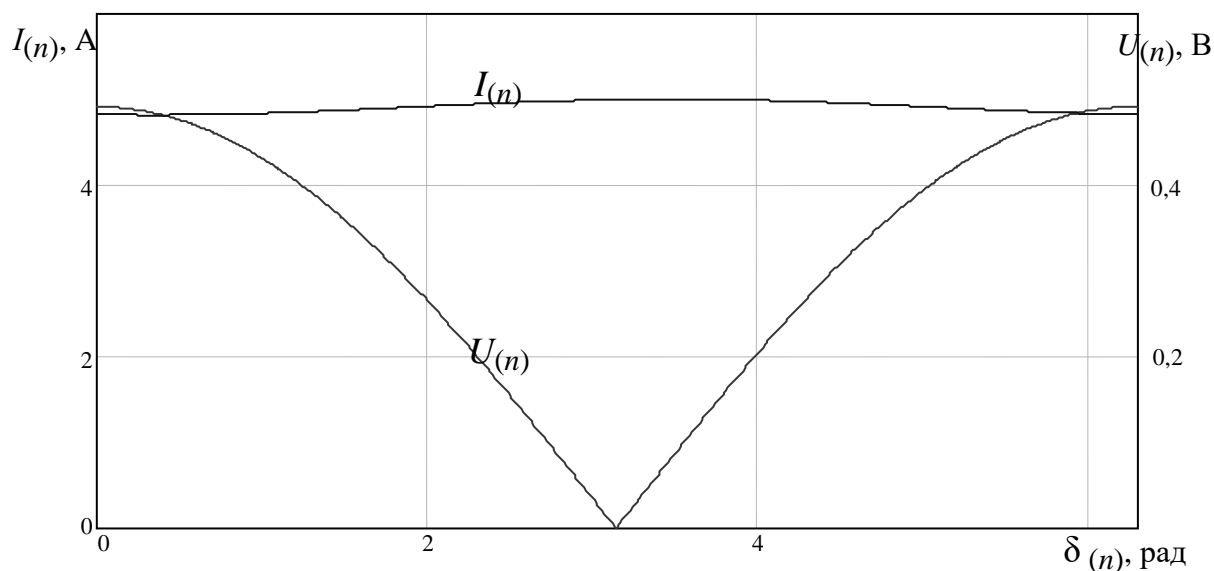


Рисунок 1.3 – Залежності діючих значень напруги і струму від кута $\delta_{(n)}$

Оскільки опір навантаження приблизно в 50 разів більший від опору системи, то струм n -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача (див. вирази (1.4)). Отже, наявність струму n -ї ГС на межі балансової належності системи і споживача свідчить про наявність спотворення в навантаженні споживача.

Метод дольових внесків виявлення гармонічних джерел полягає у вимірюванні гармонічних напруг і струмів на межі балансової належності, уточненні опорів системи і навантаження, а потім обчисленні дольового внеску гармонічних джерел [4]-[8].

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.2). Струм n -ї ГС на межі балансової належності можна виразити через струми спотворення системи $J_{(n)c}$ і навантаження $J_{(n)n}$:

$$\dot{I}_{(n)} = \dot{J}_{(n)c} - \frac{\dot{U}_{(n)}}{\underline{Z}_{(n)c}}; \quad \dot{I}_{(n)} = -\dot{J}_{(n)H} + \frac{\dot{U}_{(n)}}{\underline{Z}_{(n)H}}. \quad (1.5)$$

З урахуванням (1.5) вирази для дольових внесків системи і навантаження в зниження якості електроенергії набудуть вигляду:

$$\dot{U}_{(n)c}^{ДВ} = \frac{(\dot{U}_{(n)} + \dot{I}_{(n)}\underline{Z}_{(n)c})\underline{Z}_{(n)H}}{\underline{Z}_{(n)H} + \underline{Z}_{(n)c}}; \quad \dot{U}_{(n)H}^{ДВ} = \frac{(\dot{U}_{(n)} - \dot{I}_{(n)}\underline{Z}_{(n)H})\underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)H} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.6)$$

З (1.5) також випливає, що у разі сталого значення струму спотворення в системі і зміни струму спотворення в навантаженні можна визначити опір системи, а у разі сталого значення струму спотворення навантаження і зміни струму спотворення в системі можна визначити опір навантаження:

$$\underline{Z}_{(n)c} = - \left. \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}} \right|_{\dot{J}_{(n)H} = \text{var}}; \quad \underline{Z}_{(n)H} = \left. \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}} \right|_{\dot{J}_{(n)c} = \text{var}}. \quad (1.7)$$

У такому випадку дійсна частина еквівалентного опору $\underline{Z}_{(n)e} = \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}}$ може виступати як критерій наявності джерела спотворення в системі або в навантаженні. Якщо дійсна частина опору $\underline{Z}_{(n)e}$ додатня, то джерело гармоніки знаходиться в системі. Якщо дійсна частина опору $\underline{Z}_{(n)e}$ від'ємна, то джерело гармоніки знаходиться на стороні споживача [8].

Оскільки цей метод ґрунтується на гармонічних варіаціях, які є відносно слабкими, то дуже важко визначити гармонічний опір з достатньою точністю. Недоліками методу є: а) високі вимоги до вимірювання гармонік напруги та струму, особливо щодо їх аргументів; б) оскільки інтервал часу між вимірами повинен бути малим (1 – 3 с), то вимагається велика кількість

розрахунків; в) точність розрахунків може бути досягнута виключно тоді, коли домінуюче джерело гармонік знаходиться на одній стороні [9].

В [10]-[13] для експериментального визначення фактичного внеску навантаження та системи в зниження якості електроенергії запропоновано використовувати метод активного експерименту (увімкнення або вимкнення конденсаторної батареї, увімкнення трансформаторів на паралельну роботу, перемикання регульовального відгалуження трансформатора, збільшення активного опору фільтрокомпенсувального пристрою).

Ці методи є достатньо складними в реалізації. Наприклад, для реалізації методу із застосуванням фільтрокомпенсувального пристрою (ФКП) для визначення джерела вищих гармонік, що вносить найбільший вклад в коефіцієнт гармонічних складових напруги електричної мережі промислового підприємства необхідно [13]:

- провести аналіз спектра гармонік і визначити гармоніки, які вносять найбільший внесок в сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги;

- варіюючи активний опір ФКП, слід отримати залежність струму системи від $R_{\text{ФКП}}$.

- якщо функція має увігнутий вигляд, або опуклий з наявністю екстремуму, то найбільший вплив на установки конденсаторних батарей матимуть спотворення в напрузі, що викликані мережею живлення;

- якщо функція має опуклий характер, без наявності екстремумів, то найбільший вплив робить спотворення струму, викликаного нелінійним навантаженням самого підприємства.

В [14]–[17] обґрунтовано метод оцінювання впливу навантажень споживача на рівень напруги n -ї ГС в ТЗП, що володіє на відміну від методу ДВ властивістю автономності. На основі введених коефіцієнтів збігу за фазою струмів $K_{cI(n)}$ та провідностей $K_{cY(n)}$:

$$K_{cI(n)} = \left| \frac{\sum_{m=1}^M \dot{I}_{(n)m}}{\sum_{m=1}^M |\dot{I}_{(n)m}|} \right|; \quad K_{cY(n)} = \left| \frac{\sum_{m=1}^M \underline{Y}_{n(m)}}{\sum_{m=1}^M |\underline{Y}_{n(m)}|} \right|, \quad (1.8)$$

які можуть приймати значення на проміжку від 0 до 1, вираз для модуля напруги набуде вигляду:

$$U_{(n)} = \frac{K_{cI(n)} \sum_{m=1}^M |\dot{I}_{(n)m}|}{K_{cY(n)} \sum_{m=1}^M |\underline{Y}_{n(m)}|}. \quad (1.9)$$

Відношення $K_{cY(n)}/K_{cI(n)}$ названо коефіцієнтом вигідності, оскільки характеризує вигідність сумісного увімкнення навантажень споживача для зниження напруги n -ї ГС. Теоретично коефіцієнт вигідності може приймати значення від нуля (умова резонансу струмів) до безмежно великого значення (умова взаємної компенсації струмів ГС).

Умова допустимості режиму за напругою n -ї ГС в ТЗП має такий вигляд:

$$\sum_{m=1}^M \left(|\underline{Y}_{n(m)}| U_{(n)\text{доп}} \frac{K_{cY(n)}}{K_{cI(n)}} - |\dot{I}_{(n)m}| \right) \geq 0. \quad (1.10)$$

Достатньою умовою виконання нерівності (1.10) є додатне значення кожного складника. Це забезпечить всім споживачам однакові умови, необхідні для підтримання $U_{(n)} \leq U_{(n)\text{доп}}$ в допустимих межах. Тоді для k -го приєднання достатньо виконати умову:

$$K_{впл} = \frac{\left(U_{(n) доп} - \frac{|I_{(n)k}|}{|Y_{(n)k}|} \right)}{U_{(n) доп}} \geq 0, \quad (1.11)$$

де $K_{впл}$ – коефіцієнт впливу.

Якщо $K_{впл}$ від’ємний, то навантаження k -го споживача недопустимо спотворюють напругу за рахунок генерації n -ї ГС.

Встановлено, що [17]:

1. Споживач, який не спотворює ЯЕ, за будь-якого характеру навантажень у зовнішній мережі не може бути винен у спотворенні напруги і має $K_{впл} \geq 1$.

2. Споживач, який спотворює ЯЕ, будь-якої потужності визнається винним у погіршенні ЯЕ і має негативний $K_{впл}$. При цьому не має значення, як розташований вектор його струму спотворення щодо еквівалентного струму спотворення ЕЕС. Навіть якщо ці струми компенсують один одного, і напруга спотворення в ТЗП мала, то споживач винен в погіршенні ЯЕ і повинен вжити заходів щодо зменшення власного струму спотворення.

3. Змішаний споживач може здійснювати як позитивний, так і негативний вплив на ЯЕ в залежності від автономної напруги спотворення. Останнє залежить тільки від параметрів споживача і не залежить від взаємного розташування векторів струмів спотворення і провідностей споживача і системи.

Таким чином, для визначення струмів n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)н}$ і системи $\dot{J}_{(n)с}$ можна використати вимірювання напруг $\dot{U}_{(n)}$, струмів $\dot{I}_{(n)}$, окремих ГС, однак можливість застосування таких методів обмежується відношенням $|\dot{J}_{(n)н}| > |\dot{J}_{(n)с}|$.

1.2 Методи, що основані на використанні балансу потужностей

Для експериментального визначення відповідальності споживача за погіршення ЯЕ без його вимкнення одним з перших був запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для s -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та n -ї гармонічної складової (ГС) на межі балансової належності [18], [19], згідно з яким вважають, що окрім основного потоку енергії з мережі до навантаження, що визначається симетричною складовою прямої послідовності основної гармоніки, для несиметричних та нелінійних навантажень існує вторинний потік енергії, який направлений в електричну мережу, що зумовлений симетричними складовими зворотної та нульової послідовностей промислової частоти та вищими гармоніками.

Вирази для визначення вторинної активної та реактивної потужностей мають такий вигляд [18]:

$$P_{em} = 3U_{21}I_{21} \cos \varphi_{21} + 3U_{01}I_{01} \cos \varphi_{01} + \sum_n 3U_{1n}I_{1n} \cos \varphi_{1n} + \sum_n (3U_{2n}I_{2n} \cos \varphi_{2n} + 3U_{0n}I_{0n} \cos \varphi_{0n}); \quad (1.12)$$

$$Q_{em} = 3U_{21}I_{21} \sin \varphi_{21} + 3U_{01}I_{01} \sin \varphi_{01} + \sum_n 3U_{1n}I_{1n} \sin \varphi_{1n} + \sum_n (3U_{2n}I_{2n} \sin \varphi_{2n} + 3U_{0n}I_{0n} \sin \varphi_{0n}), \quad (1.13)$$

де U_{sn}, I_{sn} – напруга і струм s -ї послідовності n -ї гармоніки; φ_{1n} – кут зсуву фаз між напругою і струмом s -ї послідовності n -ї гармоніки.

Активну та реактивну потужності n -ї ГС описують виразами:

$$P_{(n)} = J_{(n)H} J_{(n)C} Z_{(n)} \sin(\delta_{(n)} + \beta_{(n)}) - J_{(n)H}^2 Z_{(n)} \sin \beta_{(n)}; \quad (1.14)$$

$$Q_{(n)} = J_{(n)H} J_{(n)C} Z_{(n)} \cos(\delta_{(n)} + \beta_{(n)}) - J_{(n)H}^2 Z_{(n)} \cos \beta_{(n)}, \quad (1.15)$$

де $\delta_{(n)}$ – кут між векторами струмів спотворення системи та навантаження $\dot{J}_{(n)c}, \dot{J}_{(n)H}$; $\beta_{(n)} = \arctg(R_{(n)} / X_{(n)})$ – кут, що доповнює до 90 ел. градусів кут між векторами гармонічної напруги та струму.

Якщо складники активної та реактивної потужностей s -ї послідовності n -ї гармоніки від'ємні, то вони направлені від споживача в мережу (від джерела спотворення) і споживачі повинні нести відповідальність за зниження показників ЯЕ.

В [20] доведено, що активну потужність n -ї ГС не можна використовувати для виявлення джерела спотворення. Це пояснюється тим, що напруга ГС визначається струмами спотворення як системи, так і навантаження в рівній мірі і значення активної потужності не характеризують однозначно внесок споживача в зниження ЯЕ.

На рис. 1.4 зображено залежності активної та реактивної потужностей n -ї ГС від кута $\delta_{(n)}$ для випадку $Z_{(n)c} = 0,002 + j0,05$ Ом, $Z_{(n)H} = 1 + j2,5$ Ом, $\dot{J}_{(n)c} = 5e^{j0}$ А, $\dot{J}_{(n)H} = 5e^{j\delta_{(n)}}$ А.

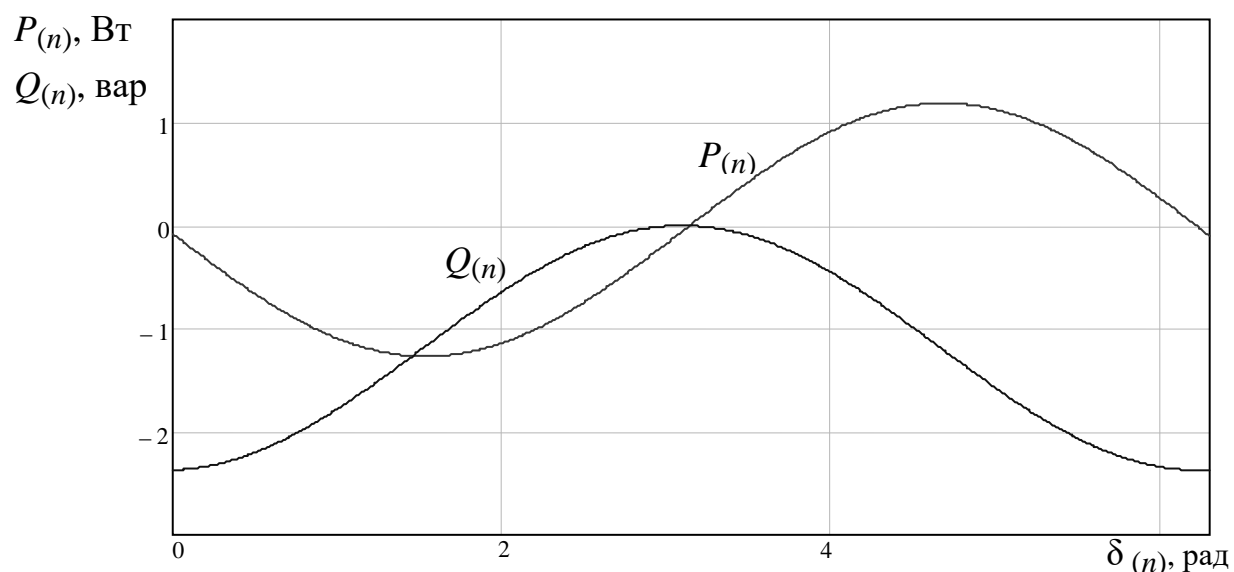


Рисунок 1.4 – Залежності активної та реактивної потужностей від кута $\delta_{(n)}$ за рівних струмів спотворення системи і навантаження

За рівних струмів спотворення системи і навантаження значення активної потужності n -ї ГС може мати як додатне, так і від'ємне значення в залежності від кута $\delta_{(n)}$. Отже, активну потужність n -ї ГС, дійсно, не можна використовувати для виявлення джерела спотворення.

Зокрема, в [21] показано, що активна і реактивна потужності на межі балансової належності для кожної гармоніки за наявності джерел вищих гармонік зі сторони системи і навантаження будуть:

$$P_{(n)} = J_{(n)c}^2 \frac{Z_{(n)c}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} R_{(n)n} - J_{(n)n}^2 \frac{Z_{(n)n}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} R_{(n)c} + \\ + J_{(n)c} J_{(n)n} \frac{\left(Z_{(n)c}^2 R_{(n)n} - Z_{(n)n}^2 R_{(n)c} \right) \cos \delta_{(n)} + \left(Z_{(n)c}^2 X_{(n)n} + Z_{(n)n}^2 X_{(n)c} \right) \sin \delta_{(n)}}{Z_{(n)\Sigma}^2}; \quad (1.16)$$

$$Q_{(n)} = J_{(n)c}^2 \frac{Z_{(n)c}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} X_{(n)n} - J_{(n)n}^2 \frac{Z_{(n)n}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} X_{(n)c} + \\ + J_{(n)c} J_{(n)n} \frac{\left(Z_{(n)c}^2 X_{(n)n} - Z_{(n)n}^2 X_{(n)c} \right) \cos \delta_{(n)} + \left(Z_{(n)c}^2 R_{(n)n} + Z_{(n)n}^2 R_{(n)c} \right) \sin \delta_{(n)}}{Z_{(n)\Sigma}^2}, \quad (1.17)$$

де $Z_{(n)\Sigma}^2 = \left(R_{(n)c} + R_{(n)n} \right)^2 + \left(X_{(n)c} + X_{(n)n} \right)^2$ – квадрат повного опору системи і навантаження на n -ій гармоніці.

Наявність взаємного складника не дає змоги визначити однозначну залежність значення або напрямку активної (реактивної) потужності n -ї ГС. Тому в [21] пропонується потужність n -ї ГС інтегрувати на інтервалі часу.

Значення реактивної потужності n -ї ГС за рівних струмів спотворення системи і навантаження має від'ємне значення за будь-якого кута $\delta_{(n)}$ окрім вузької зони, коли струми спотворення знаходяться в протифазі. Отже, реактивна потужність може бути використана для виявлення споживача, що має переважний вплив на спотворення якості електроенергії.

Авторами в [22]-[27] було запропоновано використання методу балансу активної та реактивної потужностей із застосуванням перетворення Парка для трифазної системи.

В другій модифікації методу визначають кут між струмом і напругою вищих гармонік або симетричних складових зворотної та нульової послідовностей і за характером цього кута визначають чи є споживач джерелом спотворення [28].

В [29] використано метод реактивної потужності, а в [30], [31] метод реактивної потужності розширений концепцією критичного імпедансу. Ключову ідею цього методу можна підсумувати таким чином. Реактивна потужність n -ї ГС, що генерується споживачем, оцінюється в першу чергу. Потім визначають еквівалентний опір або провідність, які називаються критичним імпедансом та критичним адмітансом:

$$CI = \frac{2 \cdot Q(n)}{I(n)^2}; CA = \frac{2 \cdot Q(n)}{U(n)^2}. \quad (1.18)$$

Порівнюючи CI (або CA) з відомим діапазоном імпедансу (або адмітансу) системи, можна знайти розташування джерела гармонік.

Недоліком такого підходу є неможливість виявлення споживача, що спотворює якість електроенергії у разі, якщо $J_{(n)n} \leq J_{(n)c}$.

Ще одним недоліком використання реактивної потужності n -ї гармоніки є їх відносна малість (десяті, соті частки відсотка від потужності основної гармоніки прямої послідовності). У разі якщо опір мережі малий (жорстка мережа), то спади напруг незначні. Розрахунок реактивної потужності ускладнений через неможливість точно виміряти амплітуди і початкові фази напруг вищих гармонік.

Група експериментальних методів оснований на використанні інтегральних потужностей, які враховують одночасно всі гармонічні

складники струмів і напруг. Авторами [32] пропонується для виявлення нелінійних споживачів використати порівняння реактивної потужності на основній гармоніці, реактивної потужності за С. Фрізе та реактивної потужності за Д. Шароном, відповідно:

$$Q_1 = U_{(1)} I_{(1)} \sin \varphi_{(1)}; Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}; Q_S = U \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 \sin^2 \varphi_{(n)}}, \quad (1.19)$$

де S, P, U – повна і активна потужності та середньоквадратична напруга. Метод базується на тому, що для випадку синусоїдних струму та напруги всі три значення Q_1, Q_F та Q_S будуть рівні, а для нелінійного навантаження – різними. Причому, Q_1 буде мінімальною, а Q_F буде мати максимальне значення. Реактивна потужність Q_S буде знаходитися між Q_1 та Q_F . Причому, у випадку несинусоїдної напруги та лінійного навантаження, Q_S має значення, яке близьке до Q_1 . В протилежному випадку, коли напруга синусоїдна і навантаження нелінійне, Q_S має значення, близьке до Q_F , через більші спотворення струму, споживаного нелінійним навантаженням. У випадку несинусоїдної напруги та нелінійного навантаження значення Q_S буде мати середнє значення між Q_1 та Q_F .

В [33], [34] запропоновано метод, що заснований на потужності спотворення К. Будяну. Як показники наявності спотворення використано потужності спотворення

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}; D_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \text{ та } D_e = \sqrt{S^2 - P_e^2 - Q_e^2}, \quad (1.20)$$

де S, P, Q – повна, активна та реактивна потужності у визначені (1.18) [35],

$$\text{згідно з яким: } P = P_1 + P_H = P_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} P_{(n)}; Q = Q_1 + Q_H = Q_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} Q_{(n)};$$

P_e, Q_e – ефективні активна та реактивна потужності у визначені [35],

$$\text{згідно з яким: } P_e = \sqrt{P_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}; \quad Q_e = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}.$$

Головним недоліком визначення К. Будяну в контексті D є те, що існують випадки, коли $D > 0$, навіть якщо навантаження є лінійним. Це може відбутися тоді, коли напруга вже спотворена, а навантаження має реактивну складову.

В [36] запропоновано метод кількісної оцінки вкладу потужності гармонічних спотворень в повну потужність S з використанням відношення потужності гармонічних спотворень до повної потужності основної гармоніки уявну потужність S з використанням відношення потужності гармонічних спотворень до повної потужності основної гармоніки

$$HDPR = \frac{D_H}{S_1}; \quad D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} = \sqrt{S_1^2 \cdot (THD_U)^2 \cdot (THD_I)^2 - P_H^2}, \quad (1.21)$$

де THD_U, THD_I – сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень напруги і струму, і порівняння значення $HDPR$ з пороговим значенням $HDPR > THR = (THD_{UB})^2$, де THD_{UB} – фонове значення коефіцієнта гармонічних спотворень за напругою для даного вузла мережі. По суті за даним методом порівнюють сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень за струмом та напругою. Якщо $THD_I > THD_{UB}$, то споживач є джерелом гармонічних спотворень.

В [37]-[39] запропоновано використовувати напрямки і значення потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм n -ї ГС. Обґрунтування такого підходу ґрунтується на тому, що струм n -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача.

Порівняємо комплексні пульсуючу потужність n -ї ГС і комплексну потужність спотворення 1-ї та n -ї ГС:

$$\underline{N}_{(n)} = \dot{U}_{(n)} \dot{I}_{(n)} = \frac{\dot{E}_{(n)c}^2 \underline{Y}_{(n)n} - \dot{J}_{(n)n}^2 \underline{Z}_{(n)c} - \dot{E}_{(n)c} \dot{J}_{(n)n} (1 - \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})}{(1 + \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})^2}; \quad (1.22)$$

$$\underline{N}_{(1,n)} = \dot{U}_{(1)} \dot{I}_{(n)} = \frac{\dot{E}_{(1)c} \dot{E}_{(n)c} \underline{Y}_{(n)n} - \dot{E}_{(1)c} \dot{J}_{(n)n}}{(1 + \underline{Y}_{(1)n} \underline{Z}_{(1)c}) (1 + \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})}. \quad (1.23)$$

З порівняння цих виразів випливає, що застосування потужності спотворення істотно спрощує можливість визначення внеску споживача в погіршення якості електроенергії.

Недоліком усіх методів є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

З дерегуляцією електроенергетики комунальні підприємства все частіше зацікавлені у визначенні відповідальності за проблеми з якістю електроенергії [40]-[42]. Це питання набуває особливого значення при формуванні контрактів на постачання електроенергії та дотримання, за допомогою тарифних ставок, додаткових витрат на погіршення якості електроенергії [9]. Один з найважливіших напрямків подальших досліджень пов'язаний із доведенням теоретичних досліджень до рівня, що забезпечує їхнє упровадження у практику експлуатації електромереж. Даний напрямок полягає у використанні нових методів щодо визначення участі суб'єктів у відповідальності за порушення вимог до ЯЕ в автоматизованих системах контролю й обліку електроспоживання (АСКОЕ) [40].

1.3 Багатоточкові методи визначення фактичних внесків споживачів в погіршення якості електроенергії

Хоча одноточковий підхід є ефективним у забезпеченні виявлення джерела гармонічних збурень з точки зору замовника та мережі, він не визначає точний вузол, де відбувається гармонічне порушення. Для систем з великим числом одночасних гармонічних джерел у будь-який момент часу гармонічні спотворення, виміряні в ТЗП, є сукупністю всіх одночасних гармонічних джерел у системі. Ці гармонічні ін'єкції, як правило, протікають від своїх джерел до мережі, отже, вони можуть частково компенсувати один одного за рахунок різниці фазового кута. Тому гармонічні спотворення в ТЗП можуть не бути точним поданням гармоніки ін'єкції в вузлах системи. В результаті застосовується багатоточковий підхід для ідентифікації гармонічних джерел [43]-[44].

Поширеним багатоточковим методом ідентифікації джерел гармонік є метод оцінки гармонічного стану (Harmonic state estimation – HSE). Вперше ідентифікація гармонічних джерел з використанням HSE була проведена в [45]. Джерела гармонічних ін'єкцій визначаються з обмежених вимірювань. Вибрані змінні стану оцінюються для кожного гармонічного складника для визначення вузлів з гармонічними внесками в систему.

Розрізняють статичну і динамічну HSE. Одним з найбільш поширених методів статичного HSE є сингулярне розкладання (Singular value decomposition – SVD) [46], [47]. Перевага SVD полягає в тому, що вирішення проблеми можна отримати за часткової спостережуваності системи. В [48] для вирішення проблеми HSE використовуються вагові найменші квадрати (Weighted least squares – WLS) і сингулярне розкладання SVD. WLS також було запропоновано в [49] для HSE, коли параметри системи є невизначеними. Головний фактор, який необхідно враховувати при проведенні HSE - розміщення вимірювальних приладів в енергосистемі.

Аналіз чутливості та критерій мінімальної дисперсії були застосовані в [50] для визначення оптимальних місць розміщення вимірювальних приладів для виконання HSE. Послідовний метод суттєво зменшує кількість вимірювальних приладів, необхідних для виконання HSE, однак не враховує зміну в часі природу гармонічних навантажень. У роботі [51] для визначення місця розташування декількох гармонічних джерел в енергосистемі використовувався двоступеневий підхід. По-перше, WLS використовувався для оцінки можливих вузлів, які представляють гармонічні джерела, а згодом застосовується евклідова норма для визначення точних вузлів з гармонічними ін'єкціями. Максимізація розрідженості також була застосована до статичної HSE [52], [53].

У динамічній HSE використовується динамічна модель енергосистеми для виконання HSE. Ця динамічна модель забезпечує інформацією про часову еволюцію системи, що дозволяє їм реагувати відповідним чином у разі змін в енергосистемі. Перевагою динамічного методу HSE перед статичним методом є можливість відстежувати вміст гармонік за певний час. Динамічна HSE була вперше проведена в [54] за допомогою фільтра Калмана та Фур'є-аналізу.

Окрім HSE, до ідентифікації декількох гармонічних джерел в енергосистемах були застосовані й інші методи. Метод незалежного компонентного аналізу для ідентифікації гармонічних джерел був представлений в [55], [56]. У роботі [55] запропоновано незалежний компонентний аналіз та теорію взаємної інформації. Для визначення поточного струму ін'єкцій гармонічного струму використовували незалежний компонентний аналіз, а для визначення гармонічних джерел застосовували теорію взаємної інформації. Пастка цього методу полягає в тому, що імпеданс системи на кожній частоті гармонік повинен бути визначений до того, як може бути проведена ідентифікація гармонічного джерела.

Теорія статистичного висновку була запропонована в [57], [58] для оцінки впливу множинних гармонічних навантажень. Напряга гармоніки на шині може бути обчислена за допомогою матриці гармонічного імпедансу мережі наступним чином:

$$\dot{U}_{(n)} = Z_{(n)A}\dot{I}_{(n)A} + Z_{(n)B}\dot{I}_{(n)B} + Z_{(n)C}\dot{I}_{(n)C} + \dot{U}_{(n)0}, \quad (1.24)$$

де $Z_{(n)A}, Z_{(n)B}, Z_{(n)C}$ – елементи гармонічного імпедансної матриці мережі. Гармонічні струми $\dot{I}_{(n)A}, \dot{I}_{(n)B}, \dot{I}_{(n)C}$ визначаються в точці приєднання споживачів. Ці струми виникають внаслідок взаємодії між системою та споживачами. Гармоніка напруги невідомим гармонічних навантажень представлена вектором $\dot{U}_{(n)0}$. Ця напруга називається фоновною гармонікою напруги. Для кількісної оцінки питомого впливу навантаження на гармоніку напруга на шині розкладається на дві складові: викликані навантаженням A і викликані іншими навантаженнями:

$$\dot{U}_{(n)A} = Z_{(n)A}\dot{I}_{(n)A}; \quad \dot{E}_{(n)} = Z_{(n)B}\dot{I}_{(n)B} + Z_{(n)C}\dot{I}_{(n)C} + \dot{U}_{(n)0}. \quad (1.25)$$

Індекс гармонічного впливу на визначається наступним чином:

$$HI = \frac{U_{(n)}U_{(n)A} \cos \alpha_{(n)}}{U_{(n)}^2}. \quad (1.26)$$

Застосовуючи закон косинуса до рис. 1.5 для вимірних даних, можна вивести рівняння:

$$U_{(n)}^2(t_i) = U_{(n)A}^2(t_i) + E_{(n)}^2(t_i) - 2U_{(n)A}(t_i)E_{(n)}(t_i)\cos \alpha_{(n)}(t_i), \quad (1.27)$$

де $U_{(n)A}(t_i) = Z_{(n)A}(t_i) \cdot I_{(n)A}(t_i)$.

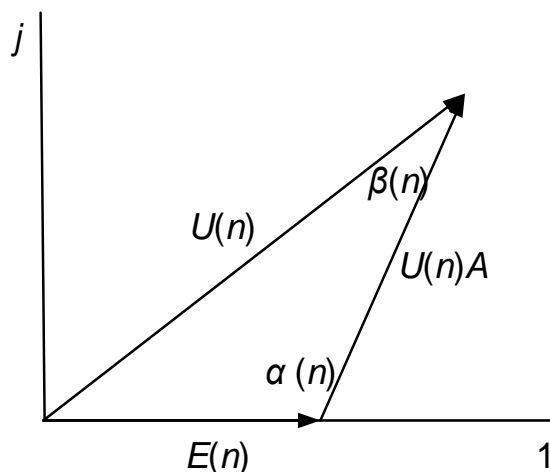


Рисунок 1.5 – Векторна діаграма гармонічних напруг

Оскільки параметри системи і навантаження змінюються, то всі величини (1.27) будуть змінюватися. Якщо в наведеному вище рівнянні використовуються середні значення $Z_{(n)A}$, $E_{(n)}$, $\alpha_{(n)}$ замість фактичних, з'явиться помилка. Рівняння (1.27) можна переписати у вигляді:

$$U_{(n)}^2(t_i) = Z_{(n)A}^2 I_{(n)A}^2(t_i) + E_{(n)}^2 - 2Z_{(n)A} I_{(n)A}(t_i) E_{(n)} \cos \alpha_{(n)} + \varepsilon_{(n)}(t_i). \quad (1.28)$$

Позначивши через $\Theta_0 = E_{(n)}^2$; $\Theta_1 = -2Z_{(n)A} E_{(n)} \cos \alpha_{(n)}$; $\Theta_2 = Z_{(n)A}^2$, отримують рівняння:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\Theta + \varepsilon, \quad (1.29)$$

$$\text{де } \mathbf{Y} = [U_{(n)}^2(t_1) U_{(n)}^2(t_2) \dots U_{(n)}^2(t_m)]^T; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & I_{(n)A}(t_1) & I_{(n)A}^2(t_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & I_{(n)A}(t_m) & I_{(n)A}^2(t_m) \end{bmatrix};$$

$$\Theta = [\Theta_0 \ \Theta_1 \ \Theta_2]^T.$$

В (1.28), $Z_{(n)A}$, $E_{(n)}$, $\alpha_{(n)}$ вважаються постійними для моментів, коли необхідно виконати кореляційний аналіз. Це припущення є критичним для запропонованого способу.

Фізичний сенс полягає в тому, що коли проводиться кореляційний аналіз між двома змінними \mathbf{X} і \mathbf{Y} , ніякі інші змінні не зміняться. Оскільки інші змінні змінюються, найпростішим підходом є вибір даних, які можуть гарантувати цю умову. Такий підхід прийнятий у пропонуваному способі. Метод вибору даних описаний нижче. Невідомі параметри можна оцінити за допомогою наступної лінійної регресії:

$$\Theta = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (1.30)$$

Для того, щоб використовувати вищезгадані результати для визначення гармонічного впливу, наступне рівняння можна записати згідно з рис. 1.5:

$$E_{(n)}^2(t_i) = U_{(n)}^2(t_i) + U_{(n)A}^2(t_i) - 2U_{(n)A}(t_i)U_{(n)}(t_i)\cos\beta_{(n)}(t_i).$$

З наведеним вище рівнянням і (1.26) індекс гармонічного впливу можна оцінити наступним чином:

$$HI(t_i) = \frac{U_{(n)}^2(t_i) + U_{(n)A}^2(t_i) - E_{(n)}^2(t_i)}{2U_{(n)}^2(t_i)} 100\%. \quad (1.31)$$

Рівняння (1.31) показує, що гармонічний вплив змінюється з часом.

Оскільки більш корисно знати середній гармонічний вплив протягом певного періоду, для цієї мети пропонується наступне просте середнє:

$$HI = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{-\Theta_0 + \Theta_2 I_{(n)A}^2(t_i)}{2U_{(n)}^2(t_i)} \right) 100\%. \quad (1.32)$$

Виходячи з аналітичного (тобто найменшого квадрата) розв'язку, рівняння для визначення гармонічного впливу може бути коротко написано як

$$HI = \left(\frac{1}{2} + \beta \hat{\Theta} \right) 100\%, \quad (1.33)$$

$$\text{де } \beta = \left[-\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{U_{(n)}^2(t_i)} \quad 0 \quad \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{I_{(n)A}^2(t_i)}{U_{(n)}^2(t_i)} \right].$$

Отже, якщо є виміряні ряди даних $I_{(n)A}(t_i)$ і $U_{(n)}(t_i)$, можна розрахувати гармонічний вплив струму навантаження.

Незважаючи на велику кількість досліджень, існують певні побоювання з точки зору ідентифікації джерел гармонік за постійно мінливих навантажень в розподільчих мережах.

1.4 Висновки та основні задачі дослідження

1. Методи визначення дольового внеску, що оснований на проведені активного експерименту з використанням увімкнення або вимкнення конденсаторної батареї, увімкнення трансформаторів на паралельну роботу, перемикання регульовального відгалуження трансформатора з регулюванням під навантаженням, регулювання активного опору фільтрокомпенсувального пристрою, складні в реалізації і мають недостатню метрологічну надійність.

2. Недоліком методів виявлення джерел спотворення, які оснований на напрямку реактивної потужності, різниці реактивних потужностей за Фрізе і Будяну тощо, є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

3. Для розгалужених мереж з багатьма джерелами спотворення перспективними є багатоточкові методи, що ґрунтуються на статистичній обробці вимірювальної інформації. Однак такі методи вимагають розвитку технічних засобів.

4. Необхідно розробити методи оцінювання впливу нелінійних і несиметричних навантажень на розподільчі електричні мережі з ізольованою та заземленою нейтраллю з виокремленням миттєвих струмів зворотної та нульової послідовностей; проаналізувати чутливість виявлення джерел спотворень різними методами; розробити АСКОЕ з функцією виявлення впливу споживачів, які спотворюють якість електроенергії.

Метою роботи є розробка методу та засобів виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих мережах з ізольованою та заземленою нейтраллю.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Розробити метод оцінювання впливу нелінійних і несиметричних навантажень на розподільчі електричні мережі з ізольованою нейтраллю;

2. Удосконалити метод оцінювання впливу нелінійних і несиметричних навантажень на розподільчі електричні мережі із заземленою нейтраллю;

3. Проаналізувати чутливість виявлення джерел спотворень різними методами;

4. Розробити АСКОЕ з функцією виявлення впливу споживачів, які спотворюють якість електроенергії.

РОЗДІЛ 2

ВІЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛАДНИКІВ ПУЛЬСУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Активна та реактивна потужності в несинусоїдних несиметричних режимах електричних мереж

Синусоїдні симетричні та несиметричні режими трифазних електричних мереж характеризуються активною P та реактивною Q потужностями, які є дійсним та уявним складниками комплексної повної потужності $\underline{S} = P + jQ$, яку знаходять як скалярний добуток векторів комплексних фазних напруг і комплексних спряжених фазних струмів [59]:

$$\underline{S} = P + jQ = \left(\dot{\mathbf{U}} \cdot \mathbf{I}^* \right) = \left(\dot{U}_A I_A^* + \dot{U}_B I_B^* + \dot{U}_C I_C^* \right), \quad (2.1)$$

де $\dot{\mathbf{U}}, \mathbf{I}^*$ – вектори комплексних напруг і комплексних спряжених струмів в фазних координатах, відповідно: $\dot{\mathbf{U}} = [\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C]^T$, $\mathbf{I}^* = [I_A^*, I_B^*, I_C^*]^T$; T – індекс транспонування вектора (матриці).

Активну та реактивну потужності вимірюють шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення [35]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt. \quad (2.2)$$

Реалізація вимірювальних перетворень полягає у використанні миттєвих активної та реактивної потужностей як скалярного добутку векторів трифазних миттєвих напруг і струмів:

$$p = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}) = (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C); \quad (2.3)$$

$$q = (\mathbf{U}' \cdot \mathbf{I}) = (u'_A i_A + u'_B i_B + u'_C i_C), \quad (2.4)$$

де \mathbf{U}, \mathbf{I} – вектори миттєвих фазних напруг і струмів $\mathbf{U} = [u_A, u_B, u_C]^T$, $\mathbf{I} = [i_A, i_B, i_C]^T$, \mathbf{U}' – вектор миттєвих фазних напруг після їх зсуву на -90 ел. градусів $\mathbf{U}' = [u'_A, u'_B, u'_C]^T$, штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів.

За умов несинусоїдності фазовий зсув напруг повинен забезпечуватися за допомогою перетворення Гільберта шляхом зсуву усіх гармонічних складників на -90 ел. градусів. Однак реалізація такого перетворення є достатньо складною [60]. Тому використовують затримку в часі на чверть періода промислової частоти. Це вносить певні похибки в результати вимірювань.

Застосування (2.3), (2.4) відповідає теорії потужності К. Будяну, згідно з якою активна та реактивна потужності дорівнюють сумі, відповідно, активних та реактивних потужностей окремих гармонік:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n; \quad Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n, \quad (2.5)$$

а для виконання умови ортогональності потужностей вводять поняття потужності спотворень D як третього складника, що зумовлений гармонічними спотвореннями напруг і струмів

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (2.6)$$

де S – повна потужність.

Поряд з класичним визначенням реактивної потужності широко використовують поняття реактивної потужності, яке було запропоновано С. Фрізе:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (2.7)$$

З (2.6), (2.7) випливає, що за умов несинусоїдності $\sqrt{Q_F^2 - Q^2}$ характеризує потужність гармонічних спотворень D .

Визначення повної потужності в (2.6) здійснюють за формулою

$$S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C , \quad (2.8)$$

де $U_A, I_A; U_B, I_B; U_C, I_C$ – діючі значення напруг та струмів відповідних фаз, які в загальному випадку за несинусоїдних напруг і струмів визначають за формулами, наприклад, для фази A :

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_A^2 dt} , \quad I_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_A^2 dt} .$$

Для визначення повної потужності Ф. Бухгольцем запропоновано також формулу:

$$S_B = |U| \cdot |I| ,$$

де $|U| = \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}$; $|I| = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}$ – модулі трифазних напруги та струму.

Для вимірювання активної та реактивної потужностей, що споживається на основній гармоніці, необхідним є формування миттєвої напруги основної гармоніки кожної k -ої фази $u_{k(1)}(t)$ та ортогональної миттєвої напруги основної гармоніки $u_{k(1)}'(t)$ кожної фази, зсунутої на -90 ел. градусів відносно $u_{k(1)}(t)$, визначення добутків відповідних миттєвих напруг на миттєвий струм навантаження $i_k(t)$ кожної фази та інтегрування миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення:

$$P_{(1)} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{A(1)} i_A + u_{B(1)} i_B + u_{C(1)} i_C) dt; \quad (2.9)$$

$$Q_{(1)} = \frac{1}{T} \int_0^T (u'_{A(1)} i_A + u'_{B(1)} i_B + u'_{C(1)} i_C) dt.$$

Активна та реактивна потужності, що споживаються на основній гармоніці, найбільш точно характеризують процеси електроспоживання.

Сучасний підхід до визначення потужностей оснований на теорії миттєвих потужностей і полягає у використанні миттєвої повної потужності трифазної системи $s(t)$ як базової величини, яку розкладають на ортогональні складники. Вираз для квадрата миттєвої повної потужності можна подати у вигляді суми квадратів скалярного та векторного добутків векторів миттєвих напруг і струмів [61]

$$s^2 = p^2 + q^2 = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U})^2 + (\mathbf{I} \times \mathbf{U})^2, \quad (2.10)$$

де $s^2 = u^2 \cdot i^2$ – квадрат миттєвої повної потужності, для визначення якої використовують квадрати миттєвих трифазних напруги та струму $u^2 = u_A^2 + u_B^2 + u_C^2$; $i^2 = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2$;

\mathbf{I} , \mathbf{U} – вектори миттєвих струмів і напруг.

У разі застосування системи фазних координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей відповідно будуть:

$$p = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}) = (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C); \quad (2.11)$$

$$q = (\mathbf{I} \times \mathbf{U}) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_A & i_B \\ u_A & u_B \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_B & i_C \\ u_B & u_C \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_C & i_A \\ u_C & u_A \end{vmatrix}^2}. \quad (2.12)$$

де \mathbf{I} , \mathbf{U} – вектори миттєвих струмів і напруг в системі фазних координат $\mathbf{I} = [i_A, i_B, i_C]^T$, $\mathbf{U} = [u_A, u_B, u_C]^T$. Миттєву реактивну потужність q можна визначити з умови ортогональності миттєвих потужностей за виразом:

$$q = \sqrt{s^2 - p^2}.$$

Необхідно відмітити, що ортогональність складників миттєвої теорії потужностей справедлива лише для миттєвих значень і не виконується для усереднених величин.

У разі застосування системи $\alpha\beta 0$ -координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей відповідно будуть [61]:

$$p = (\mathbf{I}_p \cdot \mathbf{U}_p) = (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0); \quad (2.13)$$

$$q = (\mathbf{I}_p \times \mathbf{U}_p) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ u_\alpha & u_\beta \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_\beta & i_0 \\ u_\beta & u_0 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_0 & i_\alpha \\ u_0 & u_\alpha \end{vmatrix}^2}. \quad (2.14)$$

де \mathbf{I}_p , \mathbf{U}_p – вектори струмів і напруг в системі $\alpha\beta 0$ -координат $\mathbf{I}_p = [i_\alpha, i_\beta, i_0]^T$, $\mathbf{U}_p = [u_\alpha, u_\beta, u_0]^T$.

Перехід від фазних координат до ортогональних складників здійснюється за формулами

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{p}^T \mathbf{I}; \quad \mathbf{U}_p = \mathbf{p}^T \mathbf{U}, \quad (2.15)$$

де $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix}$ – унітарна матриця переходу від

ортогональних до фазних координат.

З виразу (2.14) випливає, що в електричних мережах з заземленою нейтраллю миттєва реактивна потужність містить три складники [62]:

$$q_0 = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha; \quad (2.16)$$

$$q_\alpha = i_\beta u_0 - i_0 u_\beta; \quad q_\beta = i_0 u_\alpha - i_\alpha u_0. \quad (2.17)$$

Складник q_0 відповідає поняттю миттєвої реактивної потужності для мережі з ізольованою нейтраллю. Складники q_α і q_β характеризують появу напруги або струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю. У зрівноважених трифазних системах, до яких, зокрема, відносяться розподільчі мережі з ізольованою нейтраллю напругою 6, 10, 35 кВ, складові потужності нульової послідовності відсутні. За наявності канонічних гармонік (5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї, які утворюють прямі та зворотні симетричні послідовності, складники q_α і q_β відсутні і в мережах з заземленою нейтраллю.

Вираз (2.16) можна записати з використанням фазних напруг і струмів у вигляді [61]:

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{BC} i_A + u_{CA} i_B + u_{AB} i_C), \quad (2.18)$$

де u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} – миттєві лінійні (міжфазні) напруги.

Після усереднення (2.3), (2.11) або (2.13) отримують активну, а після усереднення (2.4), (2.16) або (2.18) – реактивні потужності, відповідно:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt; \quad Q_0 = \frac{1}{T} \int_0^T q_0(t) dt. \quad (2.19)$$

Реактивні потужності Q та Q_0 відрізняються незначно.

2.2 Пульсуючі потужності та умовні потужності зворотної послідовності

У разі синусоїдного симетричного режиму в трифазній мережі миттєві потужності $p(t)$, $q(t)$ не змінюються в часі.

За несиметричності джерела живлення, опорів елементів мережі або навантаження виникають пульсації миттєвих потужностей, які характеризують за допомогою поняття пульсуючої потужності [63]:

$$N_p(t) = -(p(t) - P); N_q(t) = -(q(t) - Q). \quad (2.20)$$

Частота пульсацій $N_p(t)$, $N_q(t)$ вдвічі вища від частоти напруги. Пульсуюча потужність $N_q(t)$ в різконесиметричних режимах відрізняється за амплітудою і фазовим зсувом від потужності $N_p(t)$ [64]. В слабо несиметричних режимах ці потужності приблизно однакові за амплітудними значеннями і зсунуті на кут 90 ел. градусів.

Синусоїдні несиметричні режими трифазних електричних мереж зручно характеризувати комплексними пульсуючими потужностями [63], [65]:

$$\underline{N}_p = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1); \underline{N}_q = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_1), \quad (2.21)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексні напруги та струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; \dot{I}_1^*, \dot{I}_2^* – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексні потужності пульсацій можна записати в системі $\alpha\beta 0$ -координат:

$$\underline{N}_p = \dot{U}_\alpha \dot{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \dot{I}_\beta; \underline{N}_q = j(\dot{U}_\beta \dot{I}_\alpha - \dot{U}_\alpha \dot{I}_\beta), \quad (2.22)$$

де $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, \dot{I}_\alpha, \dot{I}_\beta$ – комплексні напруги і струми в ортогональній системі координат $\alpha\beta$ -координат.

Комплексна потужність пульсацій \underline{N}_p однозначно характеризує пульсації активної потужності p , а комплексна потужність пульсацій \underline{N}_q однозначно характеризує пульсації реактивної потужності q_0 [66].

Слід відмітити, що за відсутності напруги та струму нульової послідовності, модуль комплексної потужності пульсацій \underline{N}_p дорівнює амплітудному значенню $N(t)$, а модуль комплексної потужності пульсацій \underline{N}_q – амплітудному значенню $N_q(t)$ [64].

Поряд з комплексними потужностями пульсацій \underline{N}_p та \underline{N}_q доцільно також використовувати комплексну умовну потужність зворотної послідовності \underline{S}_{2p} [67], яка однозначно характеризує пульсації активної потужності p та реактивної потужності q , і комплексну умовну потужність зворотної послідовності \underline{S}_{2q} [64], яка однозначно характеризує пульсації реактивної потужності q_0 , тобто:

$$\underline{S}_{2p} = 3 \left(\dot{U}_1^* I_2 + \dot{U}_2^* I_1 \right); \underline{S}_{2q} = 3 \left(\dot{U}_1^* I_2 - \dot{U}_2^* I_1 \right), \quad (2.23)$$

де I_1^*, I_2^* – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексні умовні потужності несиметрії можна записати в системі $\alpha\beta_0$ -координат:

$$\underline{S}_{2p} = \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta; \underline{S}_{2q} = j(\dot{U}_\alpha^* I_\beta + \dot{U}_\beta^* I_\alpha), \quad (2.24)$$

де $I_{\alpha}^*, I_{\beta}^*$ – комплексні спряжені струми в ортогональній системі $\alpha\beta$ -координат.

Складники миттєвих потужностей p_{2p} та q_{2p} , p_{2q} та q_{2q} , що зумовлені несиметрією напруг і струмів, можуть бути визначені по аналогії з (2.24) з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності [68], [69]

$$\begin{aligned} p_{2p} &= u_{\alpha} i_{\alpha} - u'_{\beta} i'_{\beta}; & q_{2p} &= u'_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i'_{\beta}; \\ p_{2q} &= u_{\alpha} i'_{\beta} - u'_{\beta} i_{\alpha}; & q_{2q} &= u_{\beta} i_{\alpha} + u'_{\alpha} i'_{\beta}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

де штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів (затримки в часі на чверть періоду відносно основної гармоніки напруг і струмів).

Складники миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності мають постійні складові, які є інформативними параметрами. Постійні складові p_{2p} та q_{2p} в синусоїдному режимі характеризують дійсну та уявну частини потужності \underline{S}_{2p} , а постійні складові p_{2q} та q_{2q} – дійсну та уявну частини потужності \underline{S}_{2q} . Середні значення умовних потужностей зворотної послідовності, що характеризують несиметрію струмів і напруг на основній гармоніці, визначають шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$\begin{aligned} P_{2p} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{2p}(t) dt; & Q_{2p} &= \frac{1}{T} \int_0^T q_{2p}(t) dt; \\ P_{2q} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{2q}(t) dt; & Q_{2q} &= \frac{1}{T} \int_0^T q_{2q}(t) dt. \end{aligned} \quad (2.26)$$

В несиметричних несинусоїдних режимах миттєві активну та реактивну потужності пульсацій подано сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів [70]:

$$n_p = p - P = n_{2p} + s_p; n_q = q - Q = n_{2q} + s_q, \quad (2.27)$$

де n_{2p} , n_{2q} – миттєві складові пульсацій активної та реактивної потужностей, що зумовлені несиметрією напруг і струмів; s_p , s_q – миттєві складові потужності спотворення, що зумовлені несинусоїдністю напруг і струмів.

За умов несиметрії та несинусоїдності миттєві пульсуючі активну та реактивну потужності доцільно подати сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, у такому вигляді [71], [72]:

$$n_p = p - P = (p_2 - P_2) + s_p; n_q = q - Q = (q_2 - Q_2) + s_q, \quad (2.28)$$

Потужність спотворення, що зумовлена несинусоїдністю, доцільно подати у такому вигляді

$$s_p = (p - P) - (p_2 - P_2); s_q = (q - Q) - (q_2 - Q_2). \quad (2.29)$$

Для оцінювання загального рівня пульсацій активної та реактивної потужностей $n_p = p - P$; $n_q = q - Q$ пропонується використати середньоквадратичні значення потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення

$$N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}. \quad (2.30)$$

Складники потужності гармонічних спотворень можна визначити

шляхом інтегрування квадратів миттєвих потужностей спотворень на періоді T напруги живлення

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_p^2(t) dt}; \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_q^2(t) dt}. \quad (2.31)$$

Для оцінювання рівня пульсацій, що зумовлені несиметрією за зворотною послідовністю одночасно струмів і напруг, доцільно використати середньоквадратичні значення умовних потужностей небалансу (зворотної послідовності) на періоді T напруги живлення

$$N_{2p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2p}^2(t) dt}; \quad N_{2q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2q}^2(t) dt}, \quad (2.32)$$

де $n_{2p}(t) = p_{2p}(t) - P_{2p}$; $n_{2q}(t) = q_{2p}(t) - Q_{2p}$ – складники пульсуючої потужності, що зумовлені несиметрією струмів і напруг за зворотною послідовністю.

2.3 Визначення складників пульсуючої потужності в спектральній формі

Для визначення окремих складників пульсуючої потужності розглянемо більш детально процес формування миттєвої потужності за несинусоїдності напруг і струмів [71]–[73]. Як відомо [74], для несинусоїдного режиму однофазного електричного кола миттєва активна потужність визначається з виразу

$$p = \operatorname{Re} \left(\mathbf{1}^T \cdot \left(\underline{S} \bar{\omega}^{|k-n|} + \underline{N} \bar{\omega}^{k+n} \right) \cdot \mathbf{1} \right), \quad (2.33)$$

де $\mathbf{1}$ – одиничний вектор-стовпець; $\mathbf{1}^T$ – транспонований одиничний вектор; $\underline{S}\bar{\omega}^{|k-n|}$, $\underline{N}\bar{\omega}^{k+n}$ – матриці потужностей пульсацій такого вигляду:

$$\underline{S}\bar{\omega}^{|k-n|} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12}^* \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{13}^* \bar{\omega}^2 & \dots \\ \underline{S}_{21} \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{22} & \underline{S}_{23}^* \bar{\omega}^1 & \dots \\ \underline{S}_{31} \bar{\omega}^2 & \underline{S}_{32} \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}; \quad (2.34)$$

$$\underline{N}\bar{\omega}^{k+n} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{11} \bar{\omega}^2 & \underline{N}_{12} \bar{\omega}^3 & \underline{N}_{13} \bar{\omega}^4 & \dots \\ \underline{N}_{21} \bar{\omega}^3 & \underline{N}_{22} \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{23} \bar{\omega}^5 & \dots \\ \underline{N}_{31} \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{32} \bar{\omega}^5 & \underline{N}_{33} \bar{\omega}^6 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

тут $\underline{S}_{kn} = \dot{U}_k \dot{I}_n^* = U_k e^{j\Psi_{uk}} \cdot I_n e^{-j\Psi_{in}}$; $\underline{S}_{kn}^* = U_k \dot{I}_n = U_k e^{-j\Psi_{uk}} \cdot I_n e^{j\Psi_{in}}$;

$\underline{N}_{kn} = \dot{U}_k \dot{I}_n = U_k e^{j\Psi_{uk}} \cdot I_n e^{j\Psi_{in}}$ – комплексні потужності, що характеризують пульсації; $\bar{\omega}^{|k-n|} = e^{j|k-n|\omega t}$; $\bar{\omega}^{k+n} = e^{j(k+n)\omega t}$ – комплексні оператори обертання; k, n – номери гармонічних складників напруги та струму відповідно.

Несинусоїдний режим трифазного електричного кола характеризується сукупністю гармонічних складових напруг і струмів

$$\begin{aligned}
u_{Ak} &= \sqrt{2} \left(U_{Ak} \sin \left(k\omega t + \psi_{u_{Ak}} \right) \right); \\
u_{Bk} &= \sqrt{2} \left(U_{Bk} \sin \left(k\omega t + \psi_{u_{Bk}} - k \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\
u_{Ck} &= \sqrt{2} \left(U_{Ck} \sin \left(k\omega t + \psi_{u_{Ck}} + k \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\
i_{An} &= \sqrt{2} \left(I_{An} \sin \left(n\omega t + \psi_{i_{An}} \right) \right); \\
i_{Bn} &= \sqrt{2} \left(I_{Bn} \sin \left(n\omega t + \psi_{i_{Bn}} - n \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\
i_{Cn} &= \sqrt{2} \left(I_{Cn} \sin \left(n\omega t + \psi_{i_{Cn}} + n \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\
k &= 1, \dots, m; n = 1, \dots, m.
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Миттєва потужність

$$\begin{aligned}
p = p_A + p_B + p_C &= \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^m U_{Ak} I_{An} \left[\cos \left((k-n)\omega t + (\psi_{u_{Ak}} - \psi_{i_{An}}) \right) - \right. \\
&\quad \left. - \cos \left((k+n)\omega t + (\psi_{u_{Ak}} + \psi_{i_{An}}) \right) \right] + \\
&+ \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^m U_{Bk} I_{Bn} \left[\cos \left((k-n)\omega t + (\psi_{u_{Bk}} - \psi_{i_{Bn}}) - (k-n) \frac{2\pi}{3} \right) - \right. \\
&\quad \left. - \cos \left((k+n)\omega t + (\psi_{u_{Bk}} + \psi_{i_{Bn}}) - (k+n) \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\
&+ \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^m U_{Ck} I_{Cn} \left[\cos \left((k-n)\omega t + (\psi_{u_{Ck}} - \psi_{i_{Cn}}) + (k-n) \frac{2\pi}{3} \right) - \right. \\
&\quad \left. - \cos \left((k+n)\omega t + (\psi_{u_{Ck}} + \psi_{i_{Cn}}) + (k+n) \frac{2\pi}{3} \right) \right].
\end{aligned} \tag{2.37}$$

В трифазній мережі за наявності канонічних гармонік, з яких п'ята, одинадцята і т.д. гармоніки утворюють системи зворотної послідовності, а сьома, тринадцята і т.д. – системи прямої послідовності, миттєві напругу і струм трифазної системи можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{2}(U_1 \sin(\omega t + \psi_{u1}) + U_5 \sin(-5\omega t + \psi_{u5}) + U_7 \sin(7\omega t + \psi_{u7})); \\ i &= \sqrt{2}(I_1 \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_5 \sin(-5\omega t + \psi_{i5}) + I_7 \sin(7\omega t + \psi_{i7})). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Миттєва потужність в розгорнутому вигляді запису [75]:

$$\begin{aligned} p &= U_1 I_1 \cos(\psi_{u1} - \psi_{i1}) - U_1 I_1 \cos(2\omega t + \psi_{u1} + \psi_{i1}) + \\ &+ U_1 I_5 \cos(6\omega t + \psi_{u1} - \psi_{i5}) - U_1 I_5 \cos(4\omega t - \psi_{u1} - \psi_{i5}) + \\ &+ U_1 I_7 \cos(6\omega t - \psi_{u1} + \psi_{i7}) - U_1 I_7 \cos(8\omega t + \psi_{u1} + \psi_{i7}) + \\ &+ U_5 I_1 \cos(6\omega t - \psi_{u5} + \psi_{i1}) - U_5 I_1 \cos(4\omega t - \psi_{u5} - \psi_{i1}) + \\ &+ U_5 I_5 \cos(\psi_{u5} - \psi_{i5}) - U_5 I_5 \cos(10\omega t - \psi_{u5} - \psi_{i5}) + \\ &+ U_5 I_7 \cos(12\omega t - \psi_{u5} + \psi_{i7}) - U_5 I_7 \cos(2\omega t + \psi_{u5} + \psi_{i7}) + \\ &+ U_7 I_1 \cos(6\omega t + \psi_{u7} - \psi_{i1}) - U_7 I_1 \cos(8\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i1}) + \\ &+ U_7 I_5 \cos(12\omega t + \psi_{u7} - \psi_{i5}) - U_7 I_5 \cos(2\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i5}) + \\ &+ U_7 I_7 \cos(\psi_{u7} - \psi_{i7}) - U_7 I_7 \cos(14\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i7}). \end{aligned} \quad (2.39)$$

У такому випадку матриці потужностей пульсацій будуть такими [75]:

$$\underline{S}\bar{\omega}^{|k-n|} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{15}\bar{\omega}^6 & \underline{S}_{17}^*\bar{\omega}^6 \\ \underline{S}_{51}^*\bar{\omega}^6 & \underline{S}_{55} & \underline{S}_{57}^*\bar{\omega}^{12} \\ \underline{S}_{71}\bar{\omega}^6 & \underline{S}_{75}\bar{\omega}^{12} & \underline{S}_{77} \end{bmatrix}; \quad (2.40)$$

$$\underline{N}\bar{\omega}^{k+n} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{11}\bar{\omega}^2 & \underline{N}_{15}^*\bar{\omega}^4 & \underline{N}_{17}\bar{\omega}^8 \\ \underline{N}_{51}^*\bar{\omega}^4 & \underline{N}_{55}^*\bar{\omega}^{10} & \underline{N}_{57}\bar{\omega}^2 \\ \underline{N}_{71}\bar{\omega}^8 & \underline{N}_{75}\bar{\omega}^2 & \underline{N}_{77}\bar{\omega}^{14} \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

Перша з цих матриць характеризує формування потужності спотворення переважно шостої гармоніки, а друга потужності несиметрії – переважно другої гармоніки. Вміст четвертої, восьмої, ... гармонік порівняно менший.

Таким чином, за наявності першої, п'ятої та сьомої гармонік напруг і струмів складники комплексної потужності несиметрії можна визначити

шляхом інтегрування виділеної другої гармоніки миттєвих пульсуючих потужностей на періоді T напруги живлення:

$$\operatorname{Re} \underline{N}_{2p} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \sin 2\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{N}_{2p} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \cos 2\omega t dt; \quad (2.42)$$

$$\operatorname{Re} \underline{N}_{2q} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \sin 2\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{N}_{2q} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \cos 2\omega t dt. \quad (2.43)$$

Водночас, складники комплексної потужності спотворення можна визначити шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки миттєвих пульсуючих потужностей на періоді T напруги живлення

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{p.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{p.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \cos 6\omega t dt; \quad (2.44)$$

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{q.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{q.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \cos 6\omega t dt. \quad (2.45)$$

За наявності третьої, шостої, дев'ятої, ..., гармонік, які утворюють напругу і струм нульової послідовності в трифазних мережах з заземленою нейтраллю, з виразу (2.37) випливає, що ці гармоніки за симетричного режиму не впливають на миттєву потужність і не впливають на матриці потужностей пульсацій $\underline{S}_{\bar{\omega}}^{|k-n|}$, $\underline{N}_{\bar{\omega}}^{k+n}$.

2.4 Виявлення джерел спотворень в розподільчих мережах за складниками пульсуючої потужності

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, за якого струм навантаження, крім першої гармоніки, потужність навантаження якої

$S_1 = 1405 e^{j30^\circ} = 1216,8 + j702,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, містить п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки, а амплітуди п'ятої та сьомої гармонік напруги становлять 0,5 % від амплітуди основної гармоніки, і одночасно напруга фази C менша на 10 % від значення напруг інших фаз. Залежності миттєвих фазних струмів та напруг для вказаного режиму, наведено на рис. 2.1.

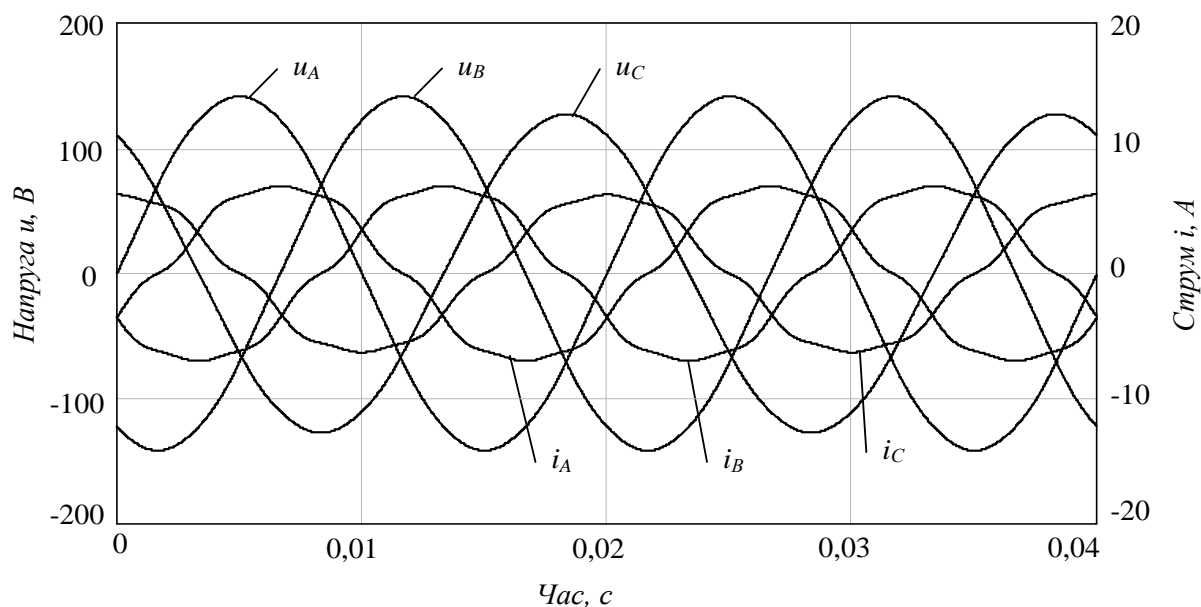


Рисунок 2.1 – Залежності миттєвих фазних струмів та напруг

На рис. 2.2 зображено залежності миттєвих потужностей p, q , які характеризуються змінними коливними процесами протягом півперіоду, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю.

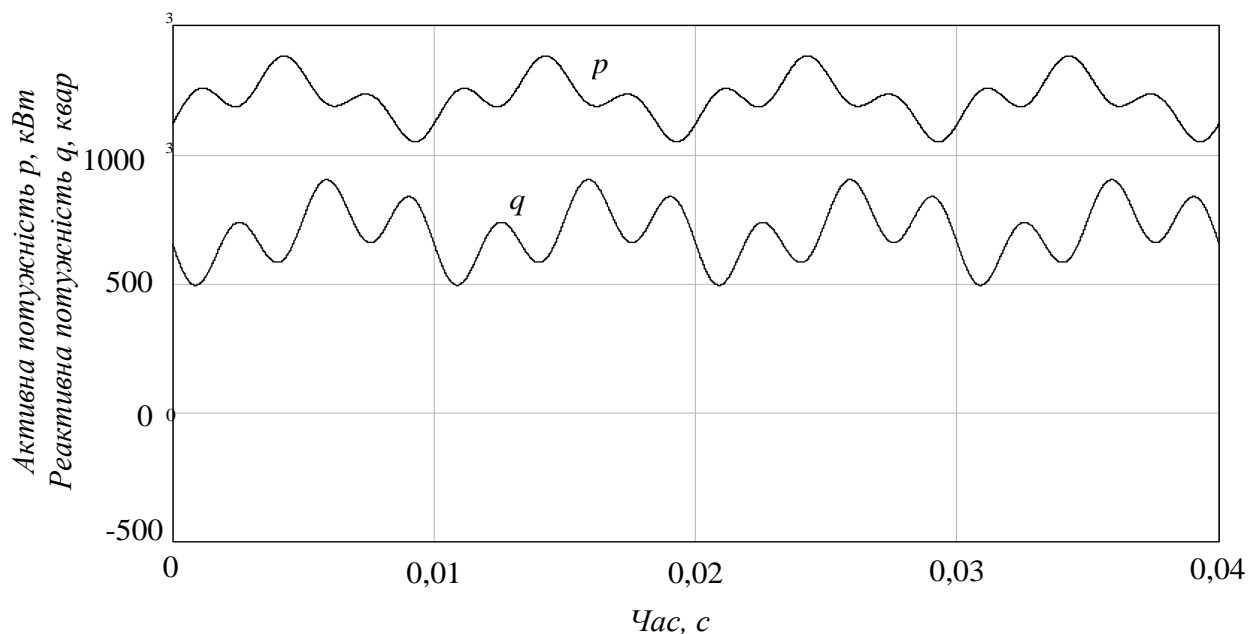


Рисунок 2.2 – Залежності миттєвих потужностей p , q

Розглянемо залежності p_2 , q_2 , коливання яких викликані лише несиметрією, і залежності $p - p_2$, $q - q_2$, коливання яких викликані лише несинусоїдністю (рис. 2.3). Коливання складників потужностей, що зумовлені несиметрією, у даному випадку містять переважно гармоніку потужності з частотою в два рази більшою від частоти напруги мережі. Коливання складників потужностей, що зумовлені несинусоїдністю, у даному випадку містять переважно гармоніку потужності з частотою в шість разів більшою від частоти напруги мережі, що пояснюється взаємовпливом основної з вищими (п'ятою та сьомою) гармоніками.

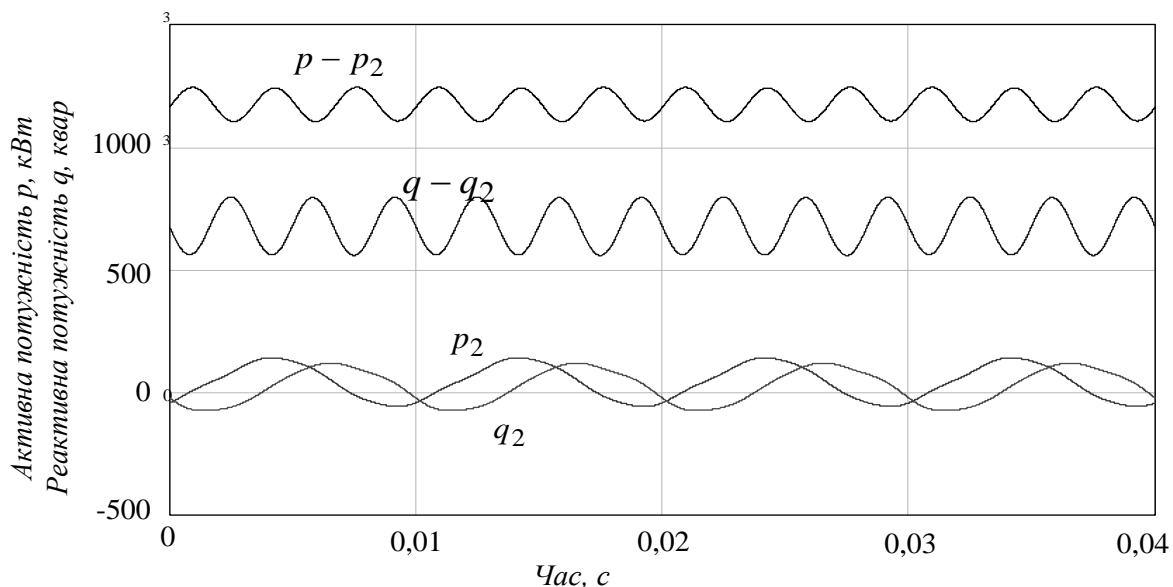


Рисунок 2.3 – Залежності p_2 , q_2 , коливання яких викликані лише несиметрією, і $p - p_2$, $q - q_2$, коливання яких викликані лише несинусоїдністю

Для наведеного прикладу розраховані за формулами (2.30) значення потужностей пульсацій будуть: $N_p = 84,1 \text{ кВт} \cdot \text{А}$; $N_q = 109,4 \text{ кВт} \cdot \text{А}$. Розраховані за формулами (2.31) значення потужностей гармонічних спотворень будуть: $S_p = 48,7 \text{ кВт} \cdot \text{А}$; $S_q = 83,2 \text{ кВт} \cdot \text{А}$. Розраховані за формулами (2.32) значення потужностей зворотної послідовності: $N_{2p} = 68,5 \text{ кВт} \cdot \text{А}$; $N_{2q} = 68,5 \text{ кВт} \cdot \text{А}$. Після усереднення миттєвих величин отримано такі значення: $P_{2p} = 42 \text{ кВт} \cdot \text{А}$, $Q_{2p} = 24 \text{ кВт} \cdot \text{А}$.

Комплексні значення потужності спотворення, які визначені за миттєвими значеннями на частоті, що відповідає шостій гармоніці напруги за формулами (2.44), (2.45), будуть: $\underline{S}_{p,6} = 48,0 - j8,3 = 48,7 e^{-j9,8^\circ} \text{ кВт} \cdot \text{А}$, $\underline{S}_{q,6} = -81,1 - j4,8 = 83,3 e^{-j176,7^\circ} \text{ кВт} \cdot \text{А}$. Отримані значення модулів практично збігаються з результатами за формулами (2.30). Таким чином, у даному випадку потужності спотворення можна характеризувати однією гармонічною складовою пульсацій активної та реактивної миттєвих

потужностей, визначеними на шостій гармоніці напруги живлення.

Потужності пульсацій на четвертій і восьмій гармоніках відповідно будуть: $\underline{N}_{p,4} = 1,5 + j2,2 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $\underline{N}_{q,4} = -2,6 + j1,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ та $\underline{N}_{p,8} = 1,2 - j2,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $\underline{N}_{q,8} = -2,0 - j1,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Для решти гармонічних складників амплітудні значення на порядок менші. Дослідження в електричних мережах систем електропостачання з подібними навантаженнями показали, що процентний вміст гармонік потужностей спотворень практично не змінюється.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого до мережі приєднаний шестипульсний випрямляч, який моделюється джерелом струму, що містить першу, п'яту та сьому гармоніки, що становлять відповідно 20 % та 14,3 % від основної гармоніки, а напруги фаз крім першої гармоніки містять п'яту та сьому гармоніки, вміст кожної з яких становить 2 % від основної гармоніки (вказаний рівень напруг вищих гармонік відповідає відносному опору мережі, що визначається як відношення повних потужностей навантаження і короткого замикання, рівному 0,02).

Проаналізуємо спочатку симетричний по фазах режим навантаження. Потужність окремих гармонік становить: $S_1 = 1500 e^{j30^\circ} = 1300 + j750 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $\underline{S}_5 = -6 e^{j30^\circ} = -5 - j3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $\underline{S}_7 = -4 e^{j30^\circ} = -3,7 - j2,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Результати вимірювань активної та реактивної потужностей: $P = 1290 \text{ кВт}$, $Q = 745 \text{ квар}$. Значення реактивної потужності за С. Фрізе $Q_F = 851 \text{ квар}$, $D = \sqrt{Q_F^2 - Q^2} = 411 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

На рис. 2.4 зображено залежності миттєвих величин p, q , з якого видно, що миттєві потужності мають значно вищий рівень пульсацій. Характер пульсацій рівномірний, зумовлений несинусоїдністю, частота коливань миттєвих потужностей в шість разів вища від частоти напруги мережі.

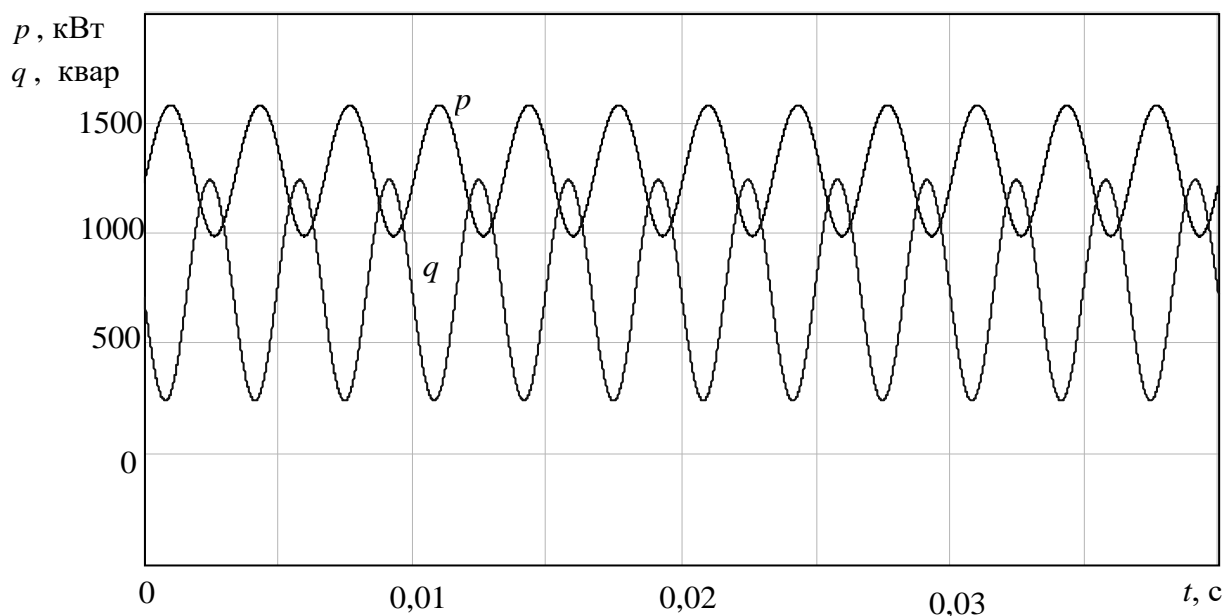


Рисунок 2.4 – Залежності миттєвих активної та реактивної потужностей за несинусоїдності

Значення $S_p = N_p = 210 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $S_q = N_q = 353 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Необхідно відмітити, що за відсутності несиметрії напруг і струмів потужність гармонічних спотворень D можна визначити через потужності S_p , S_q :

$D = \sqrt{S_p^2 + S_q^2} = 411 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Комплексні значення потужностей спотворень, які визначені за миттєвими значеннями на частоті, що відповідає шостій гармоніці напруги: $\underline{S}_p = 210e^{-j14,5^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $\underline{S}_q = 353e^{-j175^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

У разі провалу напруги фази C на 10 % від значення напруг інших фаз потужність навантаження окремих гармонік становить:

$$\underline{S}_1 = 1405 e^{j30^\circ} = 1217 + j702,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}; \quad \underline{S}_5 = -5,6 e^{j30^\circ} = -4,9 - j2,8 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$\underline{S}_7 = -4 e^{j30^\circ} = -3,5 - j2 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Активна та реактивна потужності навантаження з урахуванням усіх гармонік відповідно будуть: $P = 1208 \text{ кВт}$, $Q = 698 \text{ квар}$. Значення реактивної потужності за C . Фрізе $Q_F \approx 793 \text{ квар}$.

Для цього випадку на рис. 2.5 зображено залежності миттєвих величин p, q . Миттєві потужності p та q характеризуються змінним коливним процесом протягом пів періоду, що зумовлений несиметрією та несинусоїдністю. Обвідні цих отужностей характеризують пульсації, що зумовлені несиметрією режиму за зворотною послідовністю.

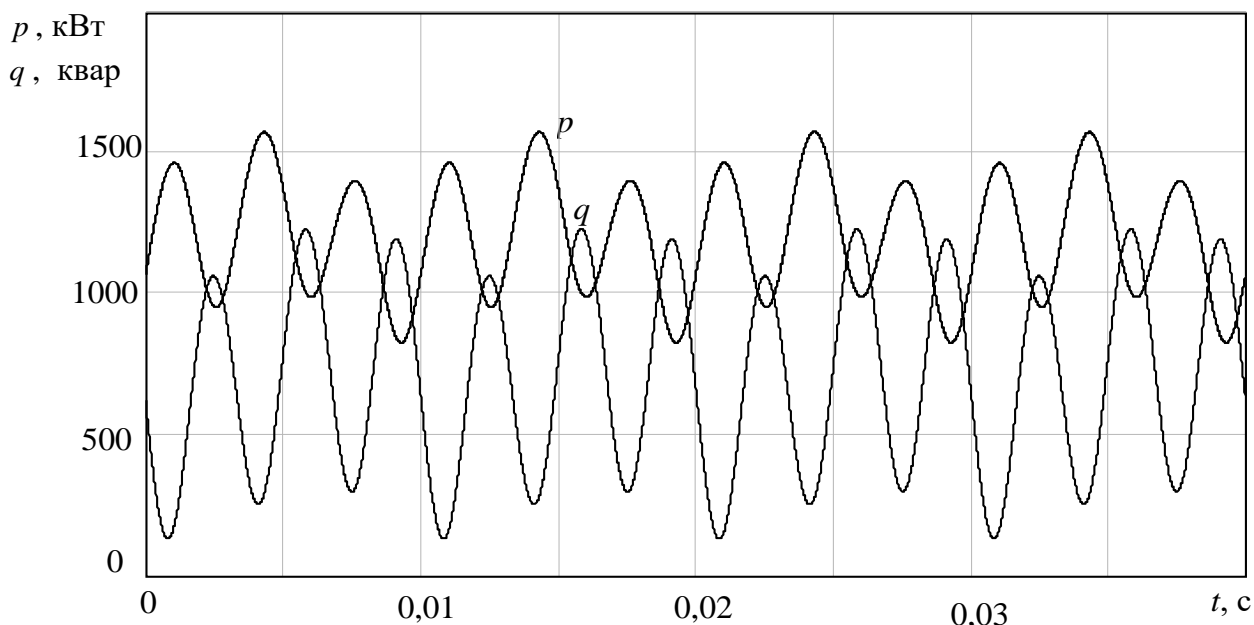


Рисунок 2.5 – Залежності миттєвих активної та реактивної потужностей за несиметрії та несинусоїдності

Розглянемо залежності $p - p_2, q - q_2$ (див. рис. 2.6), коливання яких викликані лише несинусоїдністю. Вони містять переважно гармоніку потужності з частотою в шість разів більшою від частоти напруги мережі, що пояснюється взаємовпливом основної з вищими (п'ятою та сьомою) гармоніками однакових послідовностей. Рівень пульсацій істотно збільшився порівняно з попереднім випадком. Несинусоїдний характер залежностей потужностей зворотної послідовності p_2, q_2 свідчить про наявність комбінаційних складників, зумовлених взаємовпливом основної та вищих гармонік різних послідовностей.

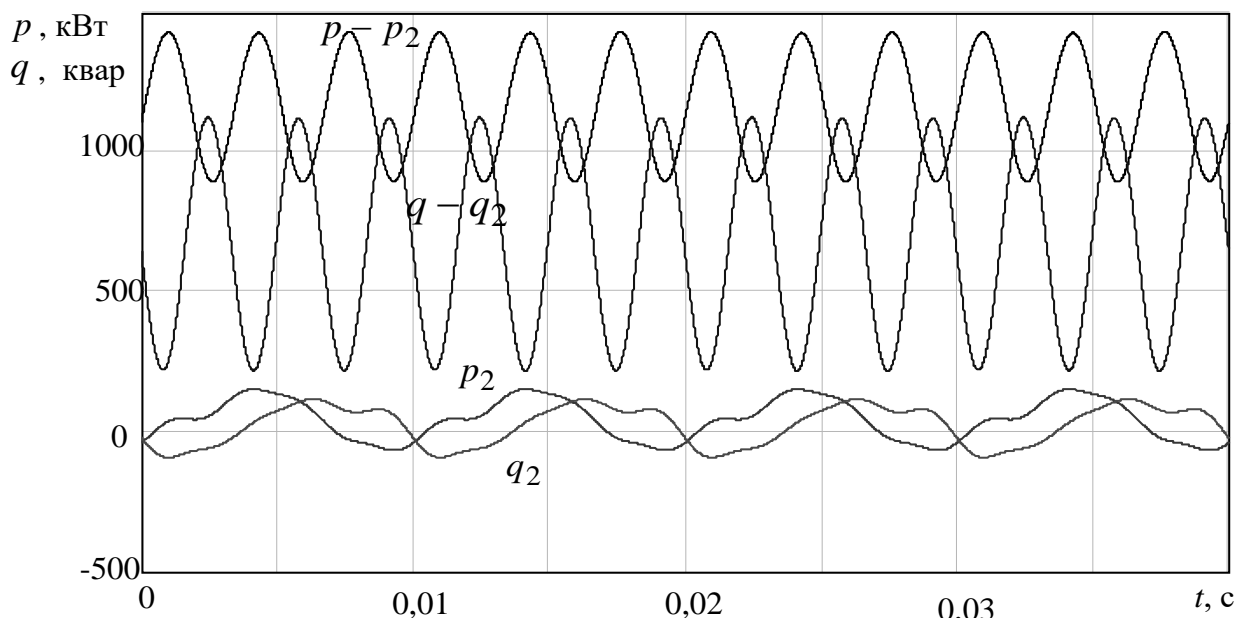


Рисунок 2.6 – Залежності миттєвих умовної потужності несиметрії та потужності спотворення

В табл 2.1 наведено результати розрахунків потужностей, а також потужностей пульсацій для двох режимів: 1) несинусоїдний симетричний режим (СР), який було розглянуто вище; 2) несинусоїдний несиметричний режим (НР), який відрізняється від розглянутого зниженням напруги та струму фази С на 10%.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків потужностей

Режим	P_1 , кВт	Q_1 , квар	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	D , кВ·А	N_p , кВ·А	N_q , кВ·А	S_p , кВ·А	S_q , кВ·А
1) СР	1299	750	1290	745	851	411	210	353	210	353
2) НР	1217	703	1208	698	797	385	208	338	190	320

За несинусоїдного несиметричного режиму (НР) значення середньоквадратичних потужностей пульсацій будуть: $N_p = 208$ кВ·А; $N_q = 338$ кВ·А. Значення потужностей гармонічних спотворень будуть:

$S_p = 190 \text{ кВ}\cdot\text{А}; S_q = 320 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$ У цьому випадку $D \neq \sqrt{S_p^2 + S_q^2},$

$D \neq \sqrt{N_p^2 + N_q^2}.$ Комплексні значення потужностей спотворень, що визначені

за миттєвими значеннями на частоті шостої гармоніки напруги будуть:

$$\underline{S}_p = 190e^{-j14,5^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А}, \underline{S}_q = 320e^{-j175^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

2.5 Висновки до розділу 2

1. Показано, що в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж пульсуюча потужність містить два складники, які зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів. Складник, що зумовлений несиметрією, представлено миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності. Складник (потужність спотворення), що зумовлений несинусоїдністю, визначено як різницю пульсуючих потужностей та миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності.

2. Для оцінювання пульсуючої потужності, потужності спотворення, а також потужностей зворотної послідовності пропонується використовувати середньоквадратичні значення.

3. Отримано вирази для визначення потужності спотворення в спектральній формі запису. У відповідності з цими виразами комплексні значення потужності спотворення визначають шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки (за наявності першої, п'ятої та сьомої гармонік напруги та струму) миттєвих активної та реактивної складових потужності спотворення на періоді T напруги живлення.

4. Виконано порівняльний аналіз несиметричних несинусоїдних режимів з оцінюванням пульсуючої потужності, потужності спотворення, а також потужностей зворотної послідовності.

РОЗДІЛ 3

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МИТТЄВИХ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ

3.1 Миттєві симетричні складові напруг і струмів

В теорії електричних машин використовуються лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів [76]:

$$f_p(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t+T/3) + \tilde{f}_C(t+2T/3)); \quad (3.1)$$

$$f_n(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t-T/3) + \tilde{f}_C(t-2T/3)); \quad (3.2)$$

$$f_0(t) = \frac{1}{3}(f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)), \quad (3.3)$$

де $f_p(t)$, $f_n(t)$, $f_0(t)$ – миттєві напруга або струм першої, другої та нульової послідовностей; $\tilde{f}_k(t) = f_k(t) - f_0(t)$, $k = \{A, B, C\}$ – миттєві фазні напруги або струми за виключенням напруги або струму нульової послідовності; T – період напруги живлення основної частоти.

Перетворення (3.1),..., (3.3) в [77] названі узагальненими симетричними складовими, де також розглянуто їх особливості. Зокрема, в [77] показано, що в періодичних несинусоїдних режимах

$$\begin{bmatrix} f_A(t) \\ f_B(t) \\ f_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_p(t) + f_n(t) + f_0(t) + f_{rA}(t) \\ f_p(t-T/3) + f_n(t+T/3) + f_0(t) + f_{rB}(t) \\ f_p(t-2T/3) + f_n(t+2T/3) + f_0(t) + f_{rC}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

де $f_{rk}(t)$, $k = \{A, B, C\}$ – залишкові складові напруг і струмів, для визначення яких використовують формулу [77]:

$$\begin{bmatrix} f_{rA}(t) \\ f_{rB}(t) \\ f_{rC}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_A(t+T/3) + \tilde{f}_A(t+2T/3) \\ \tilde{f}_B(t) + \tilde{f}_B(t+T/3) + \tilde{f}_B(t+2T/3) \\ \tilde{f}_C(t) + \tilde{f}_C(t+T/3) + \tilde{f}_C(t+2T/3) \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

В [69], [75] використовуються дещо інші лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} (f_\alpha(t) - f'_\beta(t)); \quad (3.6)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} (f_\alpha(t) + f'_\beta(t)), \quad (3.7)$$

де $f_1(t)$, $f_2(t)$ – миттєві напруга (струм) прямої та зворотної послідовності;

$$f_\alpha(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} (2f_A(t) - f_B(t) - f_C(t)), \quad f'_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (f'_B(t) - f'_C(t))$$
 – миттєві

напруга або струм в системі $\alpha\beta$ -координат; штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув усіх гармонік миттєвих величин на -90 ел. градусів, які разом з

напругою та струмом нульової послідовності $f_0(t) = \frac{1}{3} (f_A(t) + f_B(t) + f_C(t))$

утворюють ортогональну систему.

Оскільки перетворення (3.6), (3.7) є достатньо складними в реалізації, то їх можна замінити наближеними виразами:

$$f_1(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} (f_\alpha(t) - f_\beta(t - T/4)); \quad (3.8)$$

$$f_2(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} (f_\alpha(t) + f_\beta(t - T/4)), \quad (3.9)$$

$$\text{де } f_{\beta}(t-T/4) = \frac{1}{\sqrt{2}}(f_B(t-T/4) - f_C(t-T/4)).$$

Розглянемо несинусоїдний режим [78], за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки (рис. 3.1).

Потужність навантаження споживача $J_{н1}$: $P = 111,4$ кВт; $Q = 63,1$ квар.

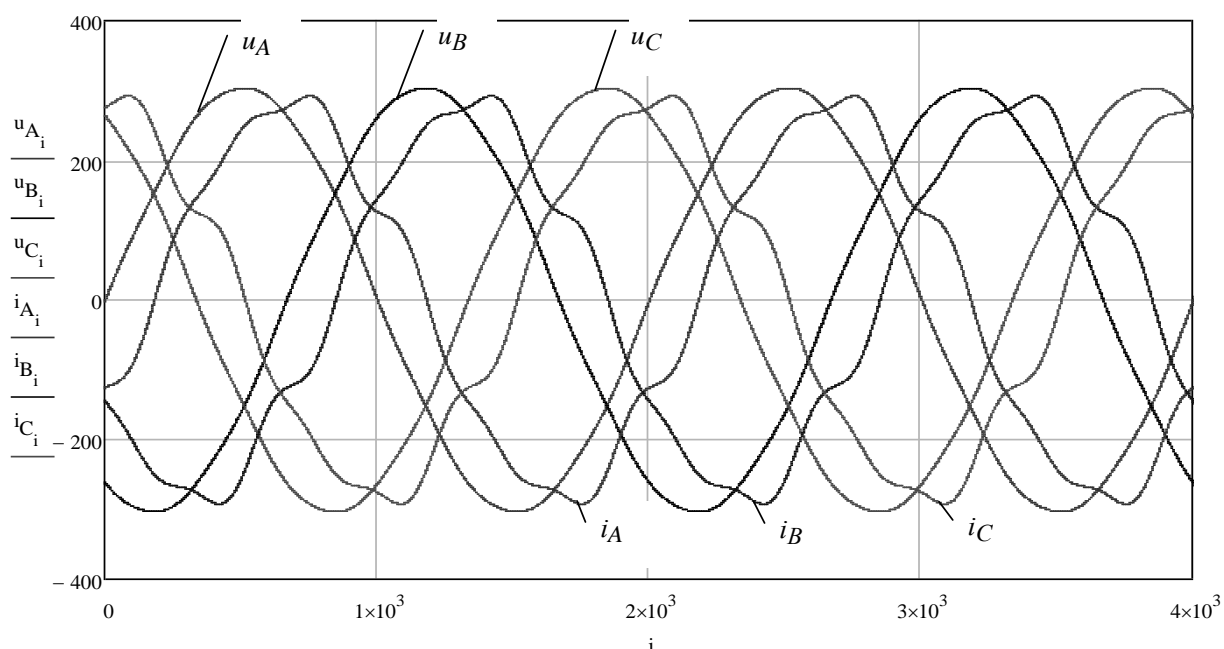


Рисунок 3.1 – Залежності миттєвих фазних струмів та напруг

На рис. 3.2 зображено залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей для симетричного навантаження фаз (графіки побудовано з частотою дискретизації 2000 точок на періоді). За симетричного режиму узагальнені миттєві струми прямої послідовності містять струми першої та сьомої гармонік, зворотної послідовності – п'ятої гармоніки, нульової послідовності – третьої гармоніки.

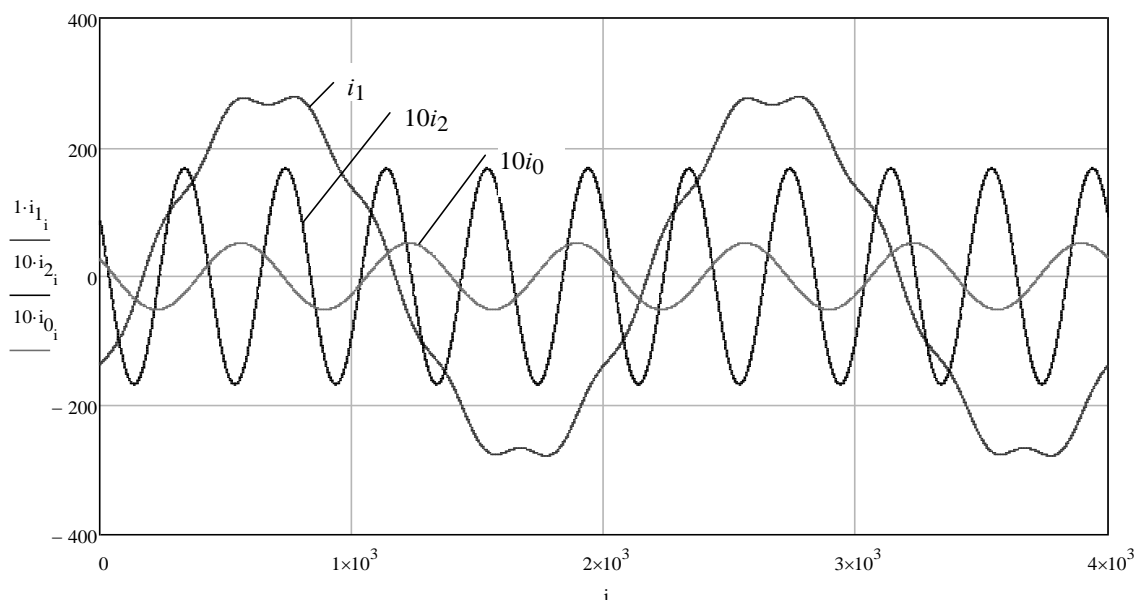


Рисунок 3.2 – Залежності узагальнених миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за симетричного режиму

За несиметричного несинусоїдного режиму (в несиметричному режимі струм основної гармоніки фази C на 10% менший від струму інших фаз) узагальнені миттєві струми прямої, зворотної та нульової послідовностей містять, відповідно, струми першої та сьомої, першої та п'ятої, першої та третьої гармонік (рис. 3.3).

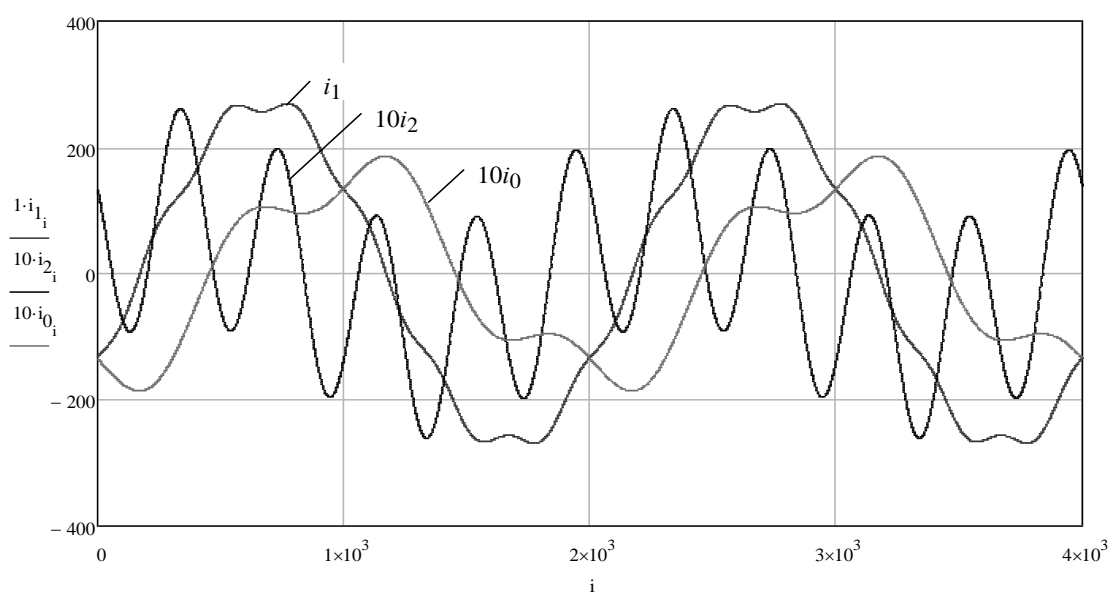


Рисунок 3.3 – Залежності узагальнених миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за несиметричного режиму

На рис. 3.4 зображено залежності струмів прямої $i_1(t)$ та $i_p(t)$, а також зворотної $i_2(t)$ та $i_n(t)$ послідовностей, а на рис. 3.5 – за несиметричного навантаження.

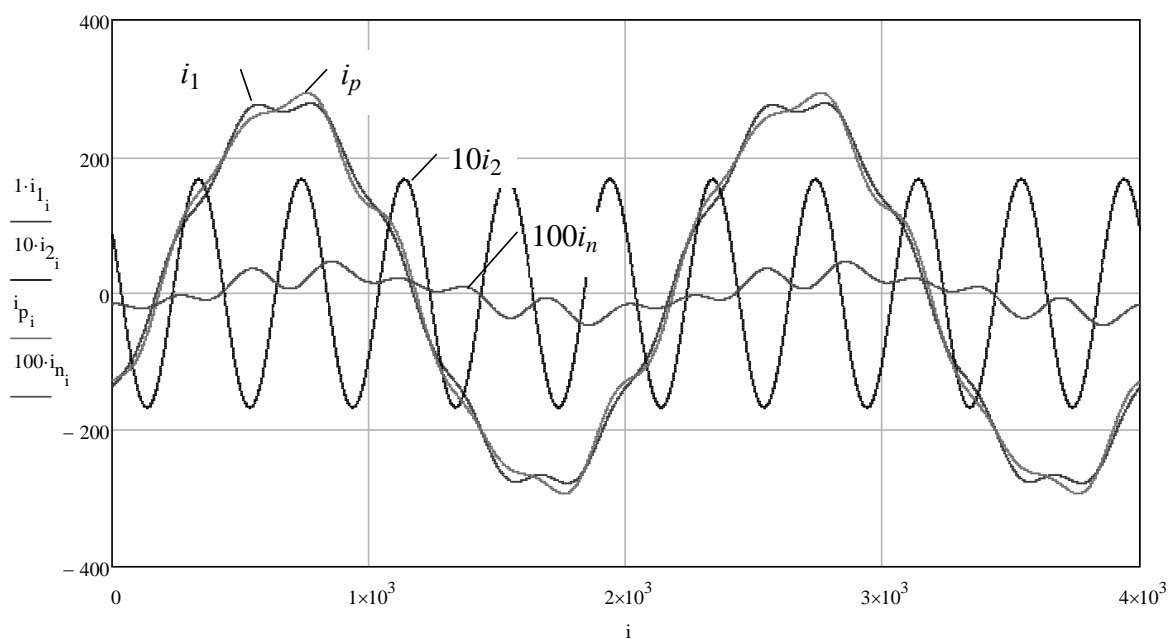


Рисунок 3.4 – Залежності струмів прямої та зворотної послідовностей за симетричних струмів фаз

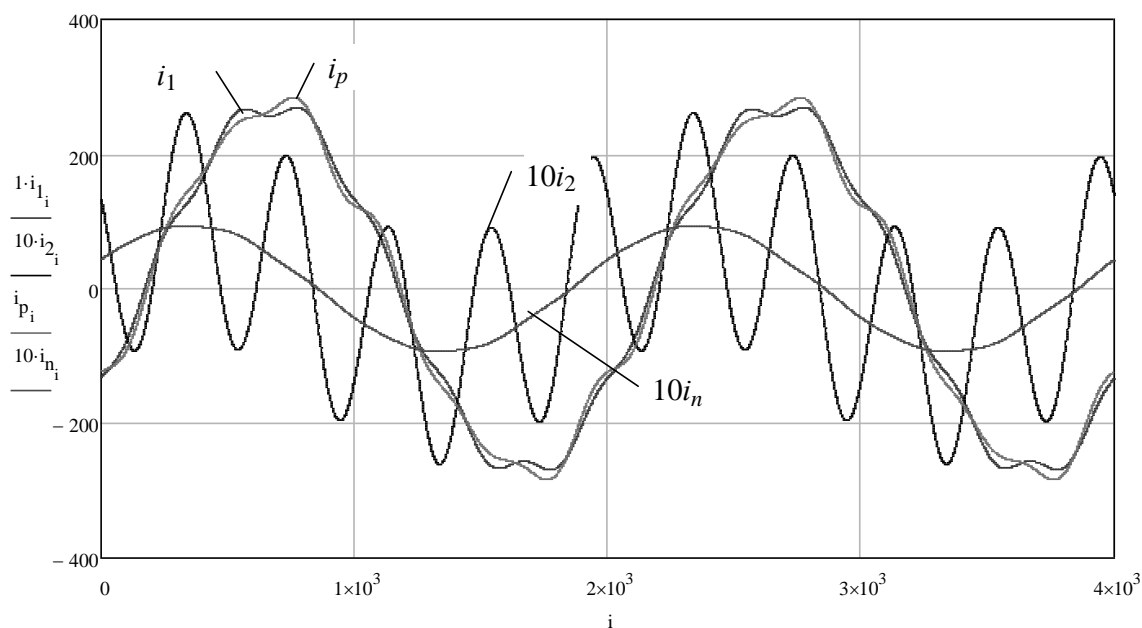


Рисунок 3.5 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за несиметричних струмів фаз

В обох режимах струми $i_1(t)$ та $i_p(t)$ відрізняються незначно. Однак струм $i_1(t)$ містить першу та сьому гармоніки, а струм $i_p(t)$ – першу, п'яту та сьому гармоніки.

Узагальнений миттєвий струм зворотної послідовності $i_2(t)$ в симетричному режимі містить п'яту гармоніку, а струм $i_n(t)$ – відсутній. За несиметричного режиму узагальнений миттєвий струм $i_2(t)$ містить струми першої та п'ятої гармоніки, а струм $i_n(t)$ – тільки струм першої гармоніки, що зумовлений несиметрією навантажень.

З теоретичної електротехніки відомо, що струми першої, четвертої, сьомої, ... гармонік утворюють пряму послідовність, струми другої, п'ятої, восьмої, ... гармонік – зворотну послідовність, третьої, шостої, дев'ятої, ... гармонік – нульову послідовність. З цієї точки зору перетворення (3.11), (3.12) краще відповідають терміну «узагальнені миттєві симетричні складові» ніж перетворення (3.6), (3.7).

3.2 Виявлення джерел спотворень за наявності канонічних гармонік з використанням миттєвих симетричних складових

З урахуванням (3.6), (3.7) миттєві умовні потужності (2.25) можуть бути записані через симетричні складові миттєвих напруг і струмів прямої та зворотної послідовностей, відповідно [69]:

$$\begin{aligned} p_{2p} &= 3(u_1 i_2 + u_2 i_1); & q_{2p} &= 3(u'_1 i_2 + u'_2 i_1); \\ p_{2q} &= 3(u_1 i_2 - u_2 i_1); & q_{2q} &= 3(u'_1 i_2 - u'_2 i_1). \end{aligned} \quad (3.10)$$

З (3.10) можна визначити окремі складники миттєвих умовних потужностей, які визначаються струмом і напругою зворотної послідовності [78], [79]:

$$\begin{aligned} p_{i_2} &= 3u_1 i_2 = 0,5(p_{2p} + p_{2q}) = 0,5(u_\alpha - u'_\beta)(i_\alpha + i'_\beta); \\ q_{i_2} &= 3u'_1 i_2 = 0,5(q_{2p} + q_{2q}) = 0,5(u'_\alpha + u_\beta)(i_\alpha + i'_\beta); \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} p_{u_2} &= 3u_2 i_1 = 0,5(p_{2p} - p_{2q}) = 0,5(u_\alpha + u'_\beta)(i_\alpha - i'_\beta); \\ q_{u_2} &= 3u'_2 i_1 = 0,5(q_{2p} - q_{2q}) = 0,5(u'_\alpha - u_\beta)(i_\alpha - i'_\beta). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Потужності (3.11), які пропорційні струму зворотної послідовності, характеризують спотворення, що виникають з вини споживачів, а потужності (3.12), які пропорційні напрузі зворотної послідовності, характеризують спотворення, що виникають в мережі живлення. Якщо потужності (3.11) перевищують деяке нормативне значення, то за перевищення має відповідати споживач. Якщо потужності (3.12) перевищують деяке нормативне значення, то за перевищення має відповідати електропостачальна компанія.

Середні значення умовних потужностей зворотної послідовності, що характеризують несиметрію струмів і напруг на основній гармоніці, визначають шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$\begin{aligned} P_{i_2} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{i_2}(t) dt; & Q_{i_2} &= \frac{1}{T} \int_0^T q_{i_2}(t) dt; \\ P_{u_2} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{u_2}(t) dt; & Q_{u_2} &= \frac{1}{T} \int_0^T q_{u_2}(t) dt. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для оцінювання рівня пульсацій, що зумовлені несиметрією окремо струмів і напруг, доцільно використати середньоквадратичні значення умовних потужностей зворотної послідовності на періоді T напруги живлення

$$\begin{aligned}
 P_{ски_2} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{i_2} - P_{i_2})^2(t) dt}; \quad Q_{ски_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{i_2} - Q_{i_2})^2(t) dt}; \\
 P_{ски_2} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{u_2} - P_{u_2})^2(t) dt}; \quad Q_{ски_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{u_2} - Q_{u_2})^2(t) dt}.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Таким чином, для виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень за зворотною послідовністю (несиметрії та вищих гармонік) споживачів доцільно використовувати миттєві умовні потужності p_{i_2}, q_{i_2} , а для оцінювання впливу спотворень, що виникають в мережі з вини електропостачальної організації, – перевищення нормативних значень величин p_{u_2}, q_{u_2} .

Для оцінювання внеску споживачів в погіршення якості електроенергії доцільно використати умовні потужності зворотної послідовності [78]–[80]. Розглянемо симетричний та несиметричний несинусоїдні режими [78], залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей яких наведені на рис. 3.2 та рис. 3.3. Залежності миттєвих потужностей зворотної послідовності $p_{i_2} = 3u_1 i_2$, $q_{i_2} = 3u'_1 i_2$ за симетричного навантаження наведено на рис. 3.6, а за несиметричного навантаження – на рис. 3.7.

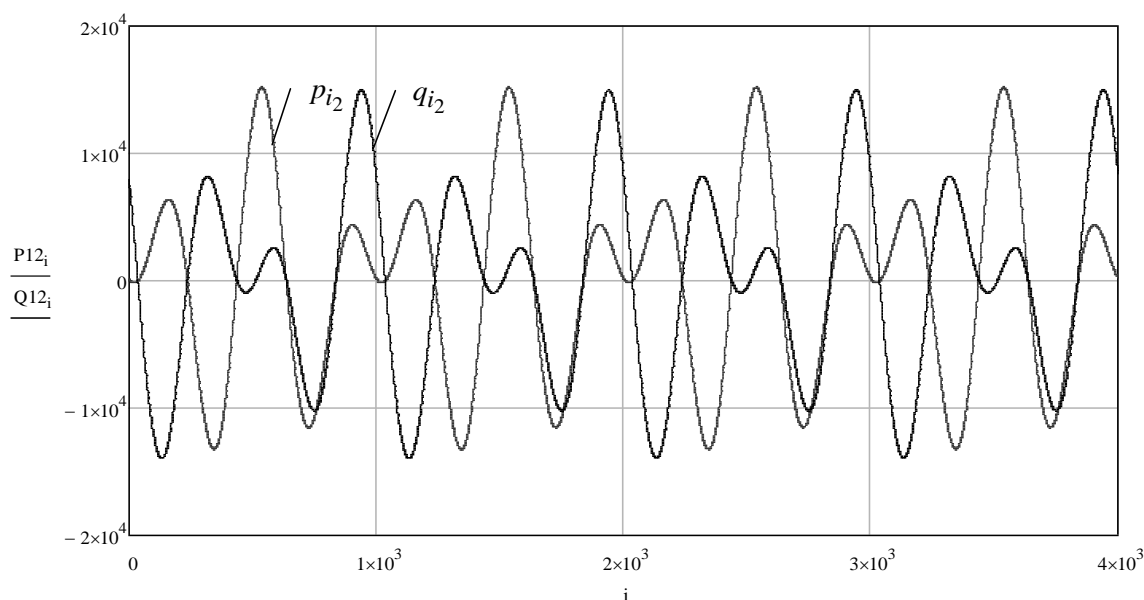


Рисунок 3.6 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за симетричних струмів фаз

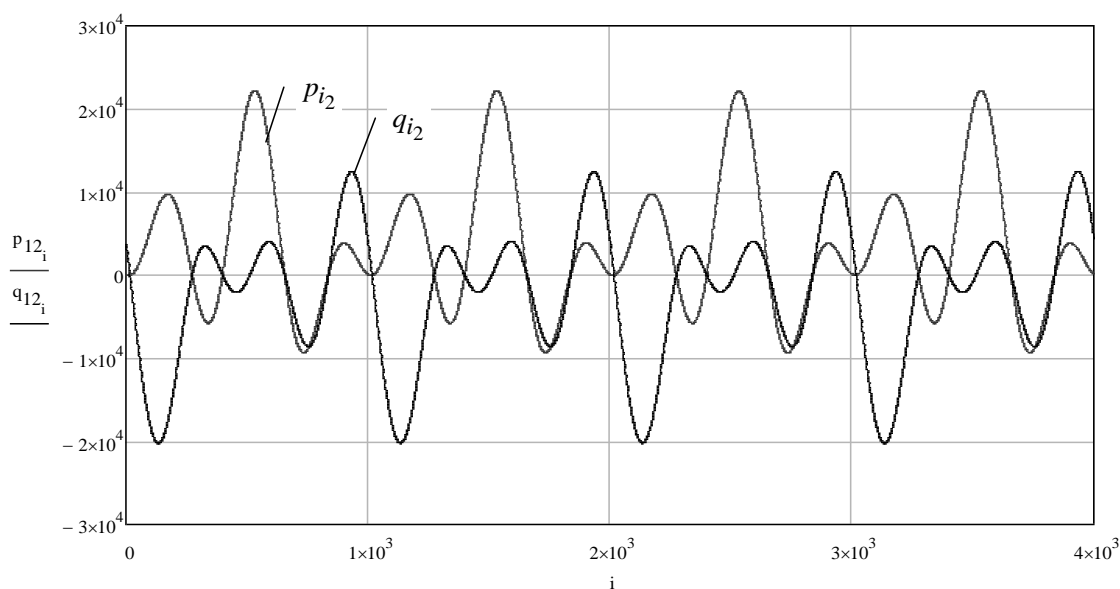


Рисунок 3.7 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за несиметричних струмів фаз

За симетричного навантаження постійні складові відсутні, середньоквадратичні значення потужностей: $P_{ски_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{ски_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. За несиметричного навантаження з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями: $P_{i_2} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{i_2} = -2,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за зворотною послідовністю основної гармоніки.

Середньоквадратичні значення потужностей дещо збільшилися:
 $P_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Отже, середні та середньоквадратичні значення потужностей зворотної послідовності можна використовувати для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії. Причому достатнім є використання середньоквадратичного значення однієї активної або реактивної потужності.

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, який виник на Дністровській ГАЕС під час роботи гідроагрегатів в насосному режимі (рис. 3.8) [79].

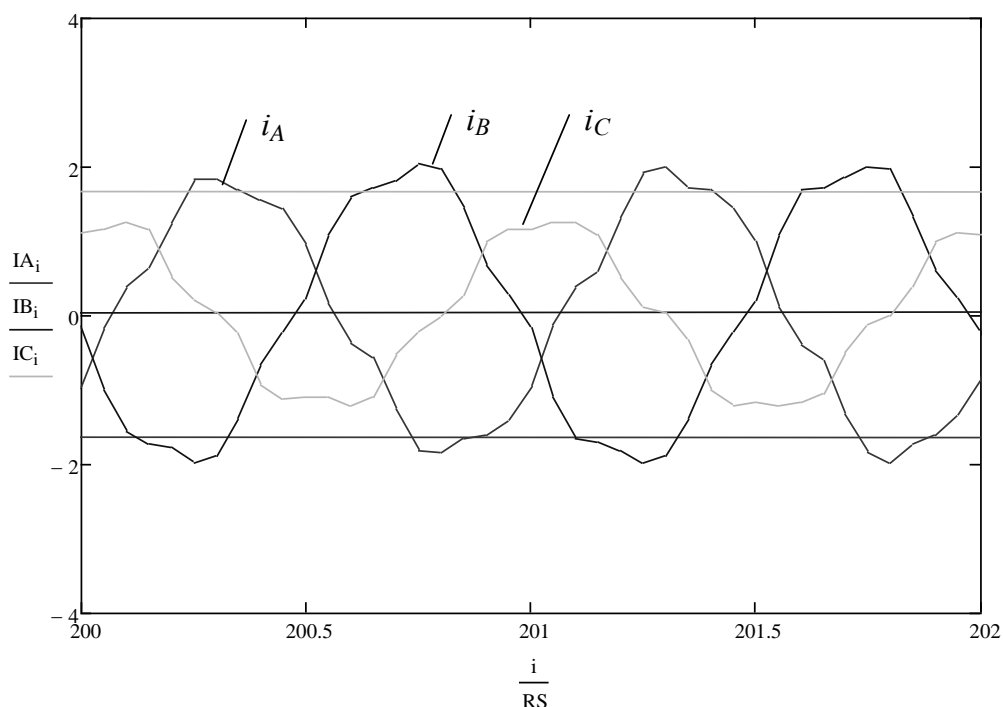


Рисунок 3.8 – Осцилограми струмів фаз на Дністровській ГАЕС

Осцилограми побудовано з використанням інформаційно-вимірювального комплексу «Регіна» з інтервалом дискретизації 1 мс (20 даних за період).

На рис. 3.9 зображено залежності струмів прямої та зворотної послідовностей $i_p(t)$, $i_n(t)$, а також залишкової складової $i_{rA}(t)$.

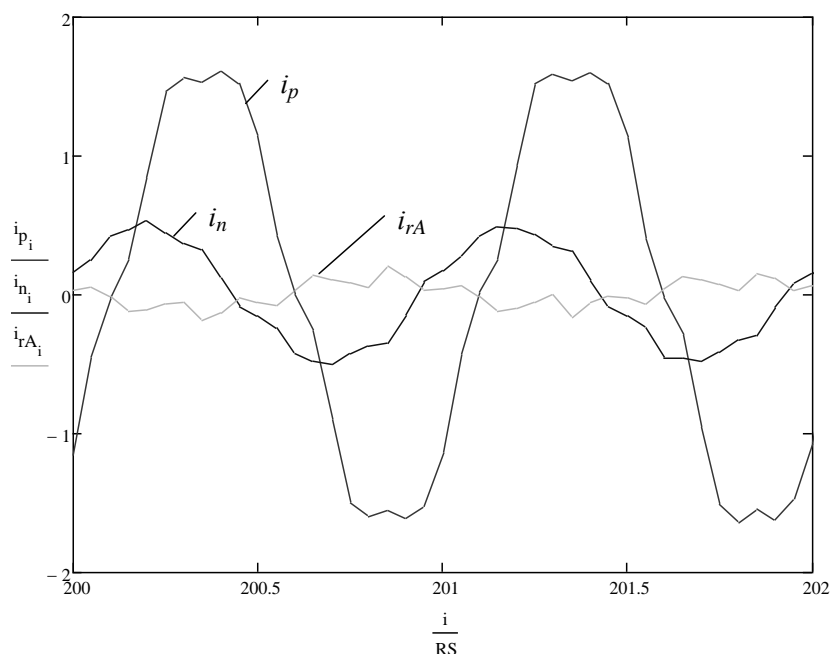


Рисунок 3.9 – Залежності струмів прямої $i_p(t)$, зворотної $i_n(t)$ послідовностей та залишкового струму $i_{rA}(t)$ на Дністровській ГАЕС

Узагальнений миттєвий струм прямої послідовності $i_p(t)$ містить струми непарних гармонік: $\dot{I}_{p1} = 1219e^{-j40^\circ}$ А; $\dot{I}_{p5} = 129e^{-j33^\circ}$ А; $\dot{I}_{p7} = 63e^{-j106^\circ}$ А. Струм $i_n(t)$ містить струм першої гармоніки: $\dot{I}_{n1} = 343e^{j22^\circ}$ А.

На рис. 3.10 зображено залежності миттєвих струмів прямої та зворотної послідовностей $i_1(t)$, $i_2(t)$, а також струм нульової послідовності $i_0(t)$.

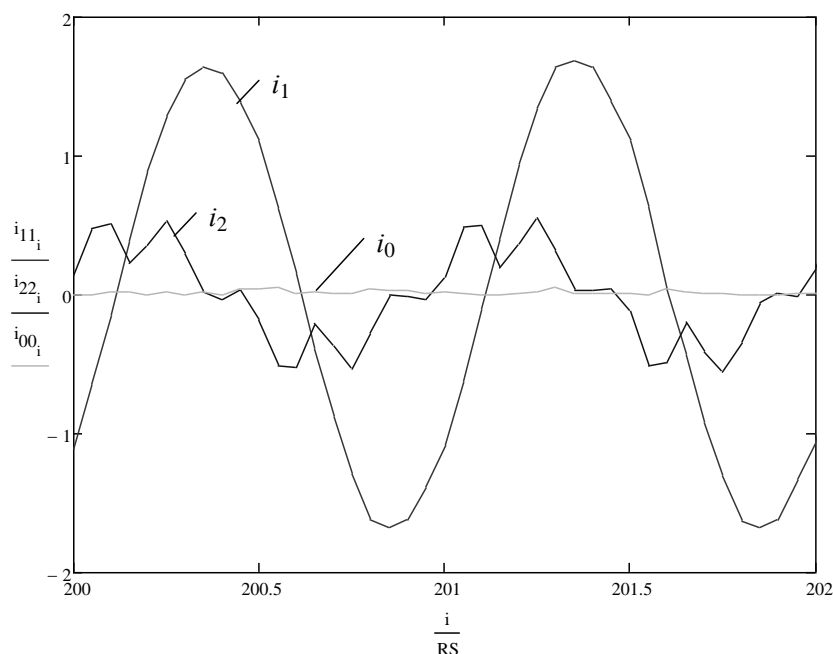


Рисунок 3.10 – Залежності узагальнених струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей на Дністровській ГАЕС

Миттєвий струм прямої послідовності $i_1(t)$ містить струм першої гармоніки: $\dot{I}_{11} = 1215e^{-j41^\circ}$ А (вміст вищих гармонік несуттєвий і, можливо, зумовлений малою вибіркою даних на періоді: $\dot{I}_{13} = 38e^{-j116^\circ}$ А; $\dot{I}_{15} = 48e^{-j94^\circ}$ А; $\dot{I}_{17} = 42e^{-j94^\circ}$ А). Струм зворотної послідовності $i_2(t)$ містить першу та п'яту гармоніки $\dot{I}_{21} = 309e^{j33^\circ}$ А, $\dot{I}_{25} = 123e^{-j16^\circ}$ А. Струм нульової послідовності $i_0(t)$ практично відсутній.

Отже, дійсно, струм $i_2(t)$ характеризує одночасно несиметрію навантажень та несинусоїдність, що зумовлена наявністю гармонік, які утворюють зворотну послідовність, зокрема, наявністю п'ятої гармоніки. Струм $i_n(t)$ характеризує несиметрію навантажень за основною гармонікою.

На рис. 3.11 зображено залежності $p_{i_2} = 3u_1i_2$, $p_{u_2} = 3u_2i_1$.

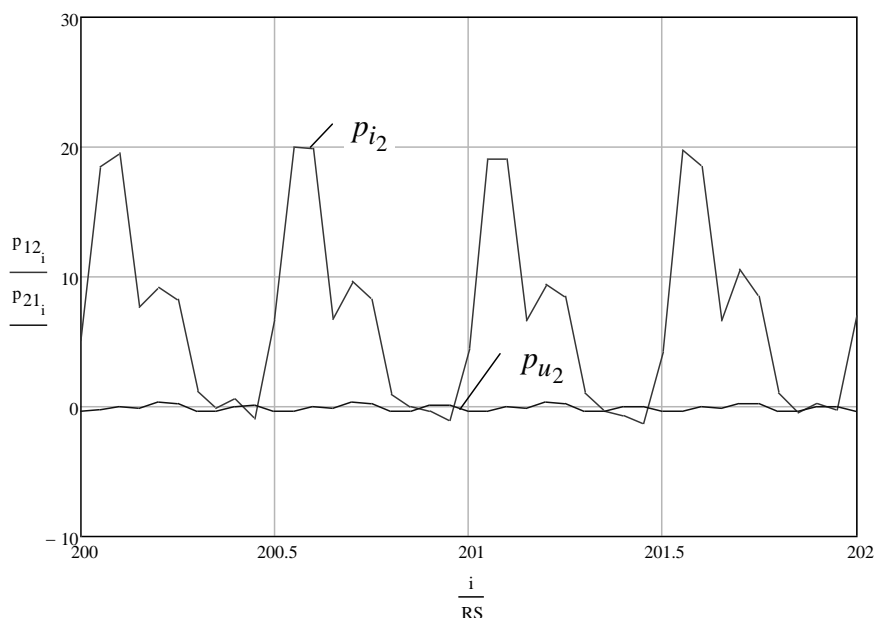


Рисунок 3.11 – Залежності p_{i_2} та p_{u_2} на Дністровській ГАЕС

Наявність постійної складової і характер пульсацій потужності p_{i_2} свідчить про те, що в цьому режимі Дністровська ГАЕС є потужним джерелом несиметрії та вищих гармонік за зворотною послідовністю.

3.3 Виявлення джерел спотворень в мережах із заземленою нейтраллю за наявності гармонік, що кратні трьом

Особливої актуальності в останні роки набула проблема якості електроенергії в низьковольтних електричних мережах [81], [82]. Це викликано, в першу чергу, широким поширенням однофазних електроприймачів, таких як зварювальні апарати, керований електропривод, комп'ютерна техніка, пральні машини і кондиціонери повітря з частотним приводом і безколекторними двигунами, які істотно спотворюють напругу. Особливістю таких споживачів є виникнення гармонік, що кратні трьом.

Струми з частотами гармонік, що кратні трьом, є струмами нульової послідовності, які в мережах із заземленою нейтраллю, підсумовуються в нейтральному проводі мережі, в результаті чого струм в нейтральному

проводі може значно перевищувати фазні струми, що спричинює збільшення додаткових втрат електроенергії та значне перегрівання PEN-провідника. Крім того, зазначені струми призводять до спотворень форми кривих напруг, зумовлюючи підвищення рівнів кондуктивних електромагнітних завад і, тим самим, порушують умови забезпечення електромагнітної сумісності відповідальних споживачів [83].

Поширимо підхід, який викладено в п. 3.2, на мережі із заземленою нейтраллю для виявлення споживачів, які створюють миттєвий струм нульової послідовності. Використаємо для цього умовні потужності нульової послідовності

$$\begin{aligned} p_{i_0} &= 3u_1 i_0; q_{i_0} = 3u'_1 i_0; \\ p_{u_0} &= 3u_0 i_1; q_{u_0} = 3u'_0 i_1. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Перші з цих величин характеризують струм нульової послідовності, другі – напругу нульової послідовності. Потужності, які пропорційні струму нульової послідовності, характеризують спотворення, що виникають з вини споживачів, а потужності, які пропорційні напрузі нульової послідовності, характеризують спотворення, що виникають в мережі живлення. Якщо останні потужності перевищують деяке нормативне значення, то за перевищення має відповідати електропостачальна компанія.

Середні значення p_{i_0} , q_{i_0} та p_{u_0} , q_{u_0}

$$\begin{aligned} P_{i_0} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{i_0}(t) dt; Q_{i_0} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{i_0}(t) dt; \\ P_{u_0} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{u_0}(t) dt; Q_{u_0} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{u_0}(t) dt \end{aligned} \quad (3.16)$$

характеризують незрівноваженість режиму за струмом та напругою нульової послідовності на основній гармоніці.

Середньоквадратичні значення центрованих величин

$$P_{cki_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{i_0}(t) - P_{i_0})^2 dt}; Q_{cki_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{i_0}(t) - Q_{i_0})^2 dt};$$

$$P_{cku_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{u_0}(t) - P_{u_0})^2 dt}; Q_{cku_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{u_0}(t) - Q_{u_0})^2 dt}$$
(3.17)

характеризують спотворення, відповідно, за струмом та напругою нульової послідовності на основній і вищих гармоніках.

Розглянемо симетричний та несиметричний несинусоїдні режими [78], залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей для яких наведені на рис. 3.2 та рис. 3.3. Залежності миттєвих потужностей нульової послідовності $p_{i_0} = 3u_1 i_0$, $q_{i_0} = 3u'_1 i_0$ за симетричного навантаження наведені на рис. 3.12. Середньоквадратичні значення цих потужностей: $P_{cki_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{cki_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

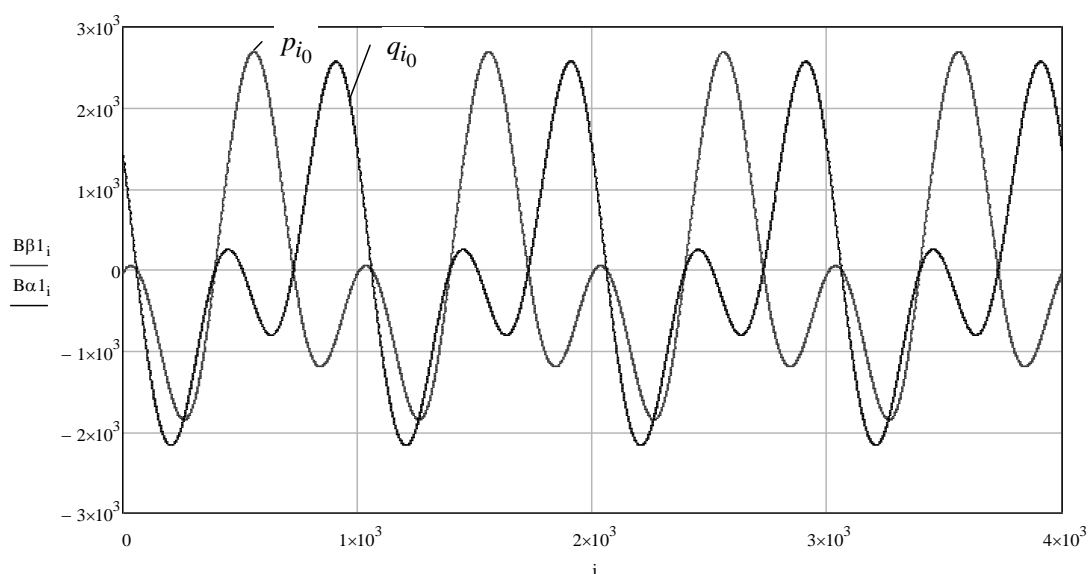


Рисунок 3.12 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за несинусоїдних симетричних струмів фаз

За несиметричного навантаження (рис. 3.13) з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями: $P_{i_0} = 0 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $Q_{i_0} = -4,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за нульовою послідовністю. Середньоквадратичні значення значно збільшилися: $P_{скі_0} = 3,7 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $Q_{скі_0} = 2,9 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Змінився також характер коливань. Якщо раніше переважали коливання з чотирикратною частотою, то тепер – з подвійною частотою відносно промислової частоти мережі. Це пояснюється тим, що в несиметричному режимі в струмі нульової послідовності переважає основна гармоніка.

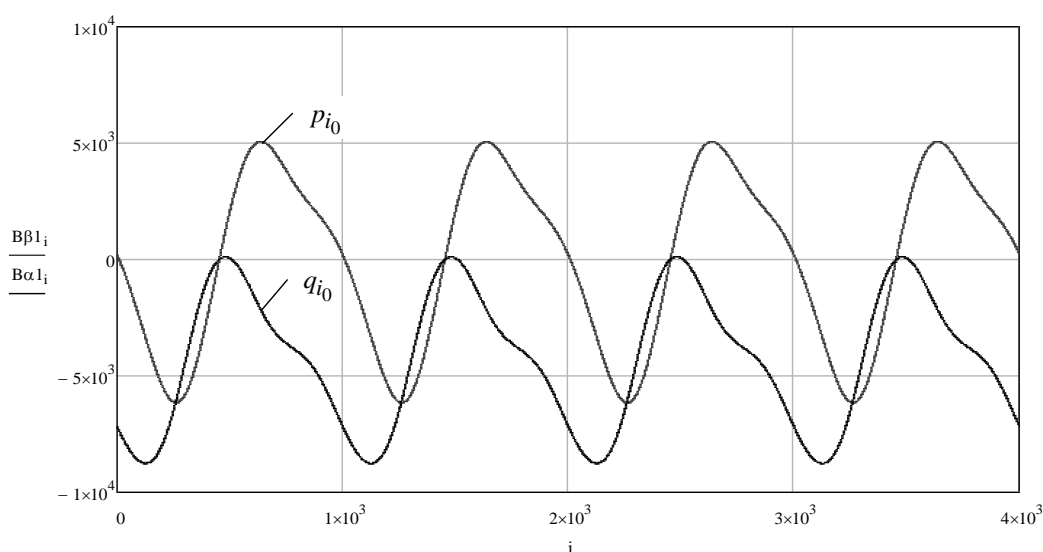


Рисунок 3.13 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за несинусоїдних несиметричних струмів фаз

Другий підхід оснований на використанні миттєвих напруг і струмів в системі $\alpha\beta 0$ -координат. Згідно з [61] незрівноваженість режиму мережі із заземленою нейтраллю можна характеризувати складниками (2.17):

$$q_{\beta} = u_{\alpha} i_0 - u_0 i_{\alpha}; \quad q_{\alpha} = i_{\beta} u_0 - i_0 u_{\beta}.$$

які характеризують появу напруги або струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю.

Умовні потужності q_β і q_α доцільно подати двома складниками [84]

$$q_{\beta i_0} = i_0 u_\alpha; \quad q_{\beta u_0} = -i_\alpha u_0; \quad (3.18)$$

$$q_{\alpha i_0} = -i_0 u_\beta; \quad q_{\alpha u_0} = i_\beta u_0. \quad (3.19)$$

Перші складники цих величин характеризують струм нульової послідовності, другі – напругу нульової послідовності.

Середні значення $Q_{\beta i_0}$ і $Q_{\beta u_0}$ та $Q_{\alpha i_0}$ і $Q_{\alpha u_0}$ характеризують незрівноваженість режиму відповідно за струмом та напругою нульової послідовності на основній гармоніці.

Середньоквадратичні значення центрованих величин $Q_{\beta i_0}$ і $Q_{\beta u_0}$ та $Q_{\alpha i_0}$ і $Q_{\alpha u_0}$ характеризують спотворення на основній і вищих гармоніках відповідно за струмом та напругою нульової послідовності і дозволяють виявляти споживачів, які спотворюють якість електроенергії.

Однак, встановлено, що потужності q_α , q_β , які характеризують незрівноваженість режиму, залежать від симетричних складових напруг і струмів зворотної послідовностей [69]:

$$\sqrt{2}q_\beta = p_{10} + p_{20}; \quad \sqrt{2}q_\alpha = q_{10} + q_{20}, \quad (3.20)$$

де

$$\begin{aligned} p_{10} &= 3(u_1 i_0 - u_0 i_1); & q_{10} &= 3(u'_1 i_0 - u_0 i'_1); \\ p_{20} &= 3(u_2 i_0 - u_0 i_2); & q_{20} &= 3(u'_2 i_0 - u_0 i'_2). \end{aligned} \quad (3.21)$$

Однак помилка при цьому є порівняно невеликою.

У разі якщо в мережі існує несиметричний несинусоїдний режим, за якого струм навантаження і напруга живлення, крім першої гармоніки, містять третю, п'яту та сьому гармоніки, пряма, зворотна і нульова послідовності напруги та струму, відповідно, будуть:

$$\begin{aligned}
u_1 &= \sqrt{2}(U_{11} \sin(\omega t + \psi_{u11}) + U_{17} \sin(7\omega t + \psi_{u17})); \\
u_2 &= \sqrt{2}(U_{21} \sin(\omega t + \psi_{u21}) + U_{25} \sin(5\omega t + \psi_{u25})); \\
u_0 &= \sqrt{2}(U_{01} \sin(\omega t + \psi_{u01}) + U_{03} \sin(3\omega t + \psi_{u03})); \\
i_1 &= \sqrt{2}(I_{11} \sin(\omega t + \psi_{i11}) + I_{17} \sin(7\omega t + \psi_{i17})); \\
i_2 &= \sqrt{2}(I_{21} \sin(\omega t + \psi_{i21}) + I_{25} \sin(5\omega t + \psi_{i25})); \\
i_0 &= \sqrt{2}(I_{01} \sin(\omega t + \psi_{i01}) + I_{03} \sin(3\omega t + \psi_{i03})),
\end{aligned} \tag{3.22}$$

тут перші індекси 1, 2, 0 вказують, відповідно, на пряму, зворотну або нульову послідовності напруги і струму, а другий – на номер гармоніки.

Наявність першої гармоніки в зворотній та нульовій послідовностях напруги і струму зумовлені, відповідно, несиметрією та неврівноваженістю режиму.

Миттєві умовні активні потужності в розгорнутій формі запису:

$$\begin{aligned}
p_{10} &= U_{11}I_{01} \cos(\psi_{u11} - \psi_{i01}) - U_{11}I_{01} \cos(2\omega t + \psi_{u11} + \psi_{i01}) - \\
&- U_{01}I_{11} \cos(\psi_{u01} - \psi_{i11}) + U_{01}I_{11} \cos(2\omega t + \psi_{u01} + \psi_{i11}) + \\
&+ U_{11}I_{03} \cos(2\omega t - \psi_{u11} + \psi_{i03}) - U_{11}I_{03} \cos(4\omega t + \psi_{u11} + \psi_{i03}) - \\
&- U_{03}I_{11} \cos(2\omega t + \psi_{u03} - \psi_{i11}) + U_{03}I_{11} \cos(4\omega t + \psi_{u03} + \psi_{i11}) + \\
&+ U_{17}I_{01} \cos(6\omega t + \psi_{u17} - \psi_{i01}) - U_{17}I_{01} \cos(8\omega t + \psi_{u17} + \psi_{i01}) - \\
&- U_{01}I_{17} \cos(6\omega t - \psi_{u01} + \psi_{i17}) + U_{01}I_{17} \cos(8\omega t + \psi_{u01} + \psi_{i17}) + \\
&+ U_{17}I_{03} \cos(4\omega t + \psi_{u17} - \psi_{i03}) - U_{17}I_{03} \cos(10\omega t + \psi_{u17} + \psi_{i03}) - \\
&- U_{03}I_{17} \cos(4\omega t - \psi_{u03} + \psi_{i17}) + U_{03}I_{17} \cos(10\omega t + \psi_{u03} + \psi_{i17});
\end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
p_{20} &= U_{21}I_{01} \cos(\psi_{u21} - \psi_{i01}) - U_{21}I_{01} \cos(2\omega t + \psi_{u21} + \psi_{i01}) - \\
&- U_{01}I_{21} \cos(\psi_{u01} - \psi_{i21}) + U_{01}I_{21} \cos(2\omega t + \psi_{u01} + \psi_{i21}) + \\
&+ U_{21}I_{03} \cos(2\omega t - \psi_{u21} + \psi_{i03}) - U_{21}I_{03} \cos(4\omega t + \psi_{u21} + \psi_{i03}) - \\
&- U_{03}I_{21} \cos(2\omega t + \psi_{u03} - \psi_{i21}) + U_{03}I_{21} \cos(4\omega t + \psi_{u03} + \psi_{i21}) + \\
&+ U_{25}I_{01} \cos(4\omega t + \psi_{u25} - \psi_{i01}) - U_{25}I_{01} \cos(6\omega t + \psi_{u25} + \psi_{i01}) - \\
&- U_{01}I_{25} \cos(4\omega t - \psi_{u01} + \psi_{i25}) + U_{01}I_{25} \cos(6\omega t + \psi_{u01} + \psi_{i25}) + \\
&+ U_{25}I_{03} \cos(2\omega t + \psi_{u25} - \psi_{i03}) - U_{25}I_{03} \cos(8\omega t + \psi_{u25} + \psi_{i03}) - \\
&- U_{03}I_{25} \cos(2\omega t - \psi_{u03} + \psi_{i25}) + U_{03}I_{25} \cos(8\omega t + \psi_{u03} + \psi_{i25}).
\end{aligned} \tag{3.24}$$

З виразів (3.21), (3.22) випливає, що наявність першої гармоніки струму та напруги нульової послідовності формує постійну складову і другу гармоніку умовних активних потужностей, а наявність третьої гармоніки струму та напруги – другу та четверту гармоніки цих потужностей.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки струмів.

Потужність навантаження основної гармоніки:

$$S_1 = 1441 e^{j30^\circ} = 1248 + j720,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

За відсутності несиметрії напруг і струмів основної гармоніки постійні складові відсутні, а пульсації $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ порівняно невеликі (рис. 3.14).

Середньоквадратичні значення пульсацій обох величин становлять:

$$\sqrt{2}Q_\alpha = 13,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad \sqrt{2}Q_{cк\beta} = 13,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Пульсації $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ містять переважно другу і четверту гармоніки відносно частоти напруги живлення, що зумовлено наявністю третьої гармоніки напруг і струмів.

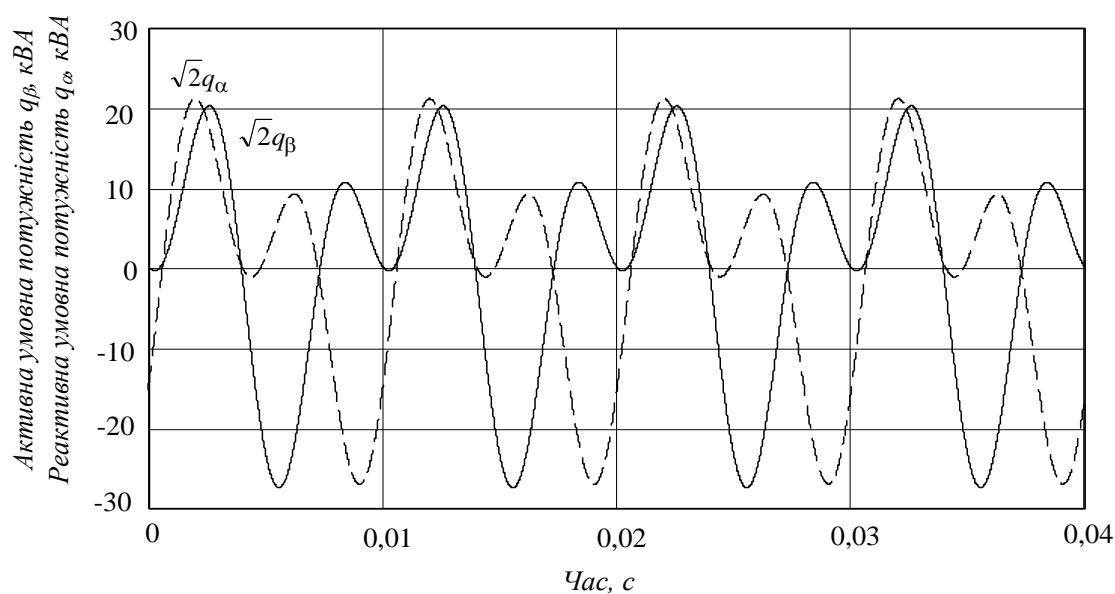


Рисунок 3.14 – Залежності $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік за симетричного навантаження

У разі якщо струм основної гармоніки фази C менший на 10 % від значення струмів інших фаз (рис. 3.15) складники $\sqrt{2}q_{\beta}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha}$ мають постійні складові $\sqrt{2}Q_{\beta} = -8,7 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і $\sqrt{2}Q_{\alpha} = -45,0 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, що зумовлені несиметрією струмів і напруг основної гармоніки.

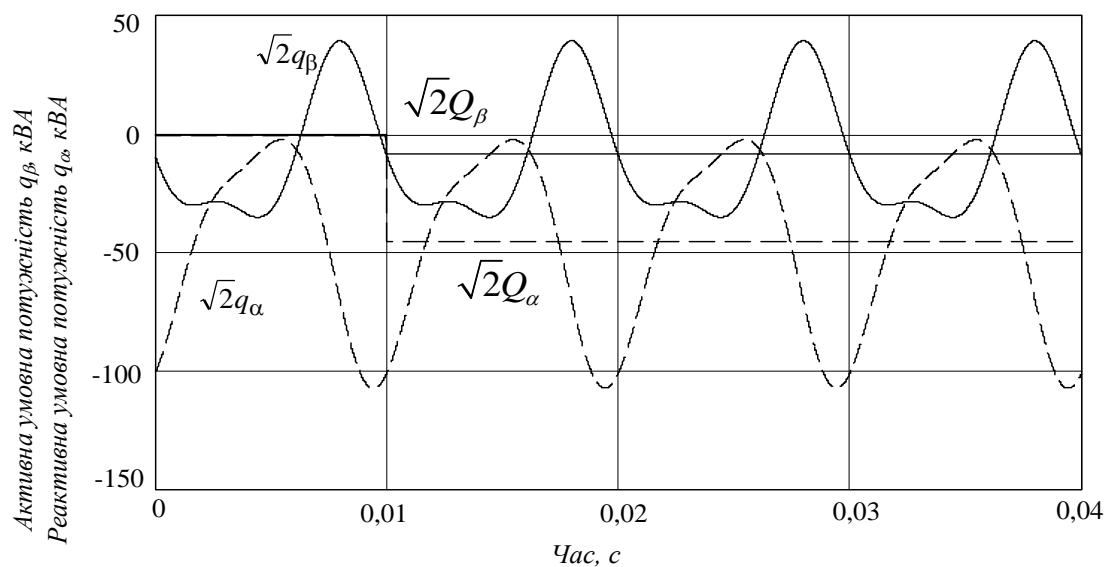


Рисунок 3.15 – Залежності $\sqrt{2}q_{\beta}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha}$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

Середньоквадратичне значення пульсацій відповідно становлять $\sqrt{2}Q_{ск\beta} = 25,9 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ та $\sqrt{2}Q_{ск\alpha} = 36,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. В пульсаціях $\sqrt{2}q_{\beta}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha}$ переважає друга гармоніка, що зумовлено несиметрією режиму по основній гармоніці та наявністю третьої гармоніки напруг і струмів.

Для несиметричного несинусоїдного режиму складники $\sqrt{2}q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\beta u_0}$ мають середні значення, відповідно, $\sqrt{2}Q_{\beta i_0} = -0,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і $\sqrt{2}Q_{\beta u_0} = -8,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ та середньоквадратичні значення, відповідно, $\sqrt{2}Q_{ск\beta i_0} = 45 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і $\sqrt{2}Q_{ск\beta u_0} = 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ (рис. 3.16). Складники $\sqrt{2}q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha u_0}$ мають середні значення, відповідно, $\sqrt{2}Q_{\alpha i_0} = -49,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і

$\sqrt{2}Q_{\alpha i_0} = 4,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ та середньоквадратичні значення, відповідно,
 $\sqrt{2}Q_{\text{ска}i_0} = 60 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ і $\sqrt{2}Q_{\text{ска}u_0} = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (рис. 3.17).

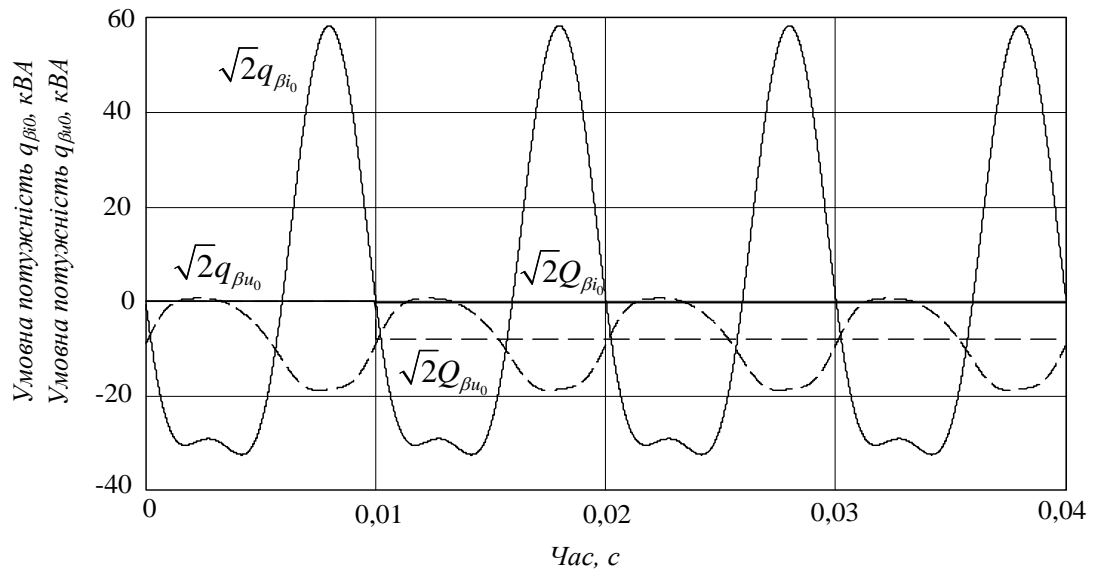


Рисунок 3.16 – Залежності $\sqrt{2}q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\beta u_0}$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

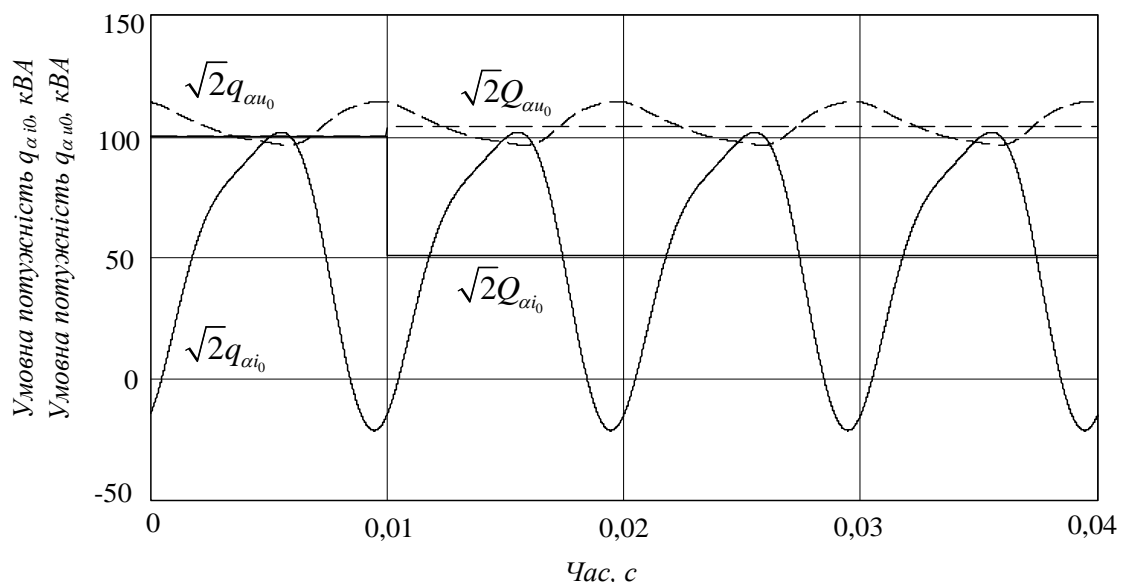


Рисунок 3.17 – Залежності $\sqrt{2}q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha u_0}$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

Таким чином [80], для виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень за нульовою послідовністю (несиметрії та вищих гармонік)

споживачів можна використовувати миттєві умовні потужності $\sqrt{2}q_{\beta i_0}$, $\sqrt{2}q_{\alpha i_0}$, які приблизно рівні p_{i_0} , q_{i_0} , а для оцінювання впливу спотворень, що виникають в мережі з вини електропостачальної організації, – перевищення нормативних значень величин $\sqrt{2}q_{\beta u_0}$, $\sqrt{2}q_{\alpha u_0}$, які приблизно рівні p_{u_0} , q_{u_0} .

3.4 Дослідження впливу опору системи (потужності і схеми сполучення обмоток силового трансформатора)

Розглянемо несинусоїдний режим [80], за якого струм навантаження містить третю, п'яту, сьому, дев'яту, одинадцяту, ... гармоніки, амплітуди яких становлять приблизно 7 %, 2 %, 0,5 %, 0,2 %, 0,08 %, ..., відповідно, від амплітуди основної гармоніки. Потужність навантаження споживача: $\underline{S} = 123,8 + j46,8 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Живлення споживача здійснюється напругою 380 В від мережі електропостачальної організації через трансформатор потужністю 400 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

Середньоквадратичні значення миттєвих потужностей спотворення, які зумовлені струмом зворотної та нульової послідовності, досить значні (табл. 3.1), що свідчить про наявність вищих гармонік в струмах зворотної та нульової послідовностей. Особливо відчутним є вплив третьої гармоніки, яка утворює струм нульової послідовності. Середньоквадратичні потужності, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності значно менші.

За несиметричного режиму, наприклад, якщо струм фази *C* менший на 10 % від значення струмів інших фаз, середньоквадратичні значення центрованих миттєвих потужностей, які зумовлені струмом зворотної та нульової послідовності, дещо більші, що зумовлено несиметрією режиму на основній гармоніці та наявністю вищих гармонік в струмах зворотної та нульової послідовностей. Середньоквадратичні потужності, що зумовлені

напругою зворотної та нульової послідовності менші.

Таблиця 3.1 – Значення середньоквадратичних потужностей (кВ·А)

Режим	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
Несиметричний Т-400 кВ·А	4,3	3,5	10,6	8,7	0,2	0,2	0,4	0,4
Симетричний Т-400 кВ·А	2,7	2,0	9,5	9,5	0,2	0,2	0,4	0,4
Симетричний Т-160 кВ·А	2,6	2,0	9,3	9,3	0,5	0,4	1,1	1,1

За несиметричного режиму виникають постійні складові, які характеризують несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями на основній гармоніці. Середні значення миттєвих потужностей, що зумовлені струмом зворотної та нульової послідовності, досить значні (табл. 3.2). Середні потужностей, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності, близькі до нуля.

Таблиця 3.2 – Середні значення інформативних параметрів за несиметричного несинусоїдного навантаження (кВ·А)

Режим	P_{i2}	Q_{i2}	P_{i0}	Q_{i0}	P_{u2}	Q_{u2}	P_{u0}	Q_{u0}
Несиметричний Т-400 кВ·А	3,5	-2,8	0,7	-4,4	0,05	-0,05	0,07	0,02

У разі якщо живлення здійснюється від трансформатора потужністю 160 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем» середньоквадратичні значення миттєвих потужностей спотворення, які зумовлені струмом зворотної та нульової послідовності, залишаються практично такими ж як і у випадку трансформатора 400 кВ·А. Середньоквадратичні потужності, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності більші. Вони різко зростають якщо живлення

здійснюється від трансформатора потужністю 160 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем»: $P_{ски0} = 9,1$ кВ·А, $Q_{ски0} = 9,1$ кВ·А.

Таким чином, використання запропонованих інформативних параметрів p_{u_2}, q_{u_2} та p_{u_0}, q_{u_0} одночасно стимулює електропостачальні організації до встановлення більш потужних трансформаторів, що сприятиме покращенню якості електроенергії.

Отже, для оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та несинусоїдності) споживачів доцільно використовувати миттєві умовні потужності p_{i_2}, q_{i_2} та p_{i_0}, q_{i_0} , а для оцінювання неефективної побудови мережі електропостачальної організації – p_{u_2}, q_{u_2} та p_{u_0}, q_{u_0} . За наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей p_{i_2}, q_{i_2} та p_{i_0}, q_{i_0} зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин. Водночас збільшення p_{u_2}, q_{u_2} та p_{u_0}, q_{u_0} свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення таких споживачів.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано процес виявлення та оцінювання внеску джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) в погіршення якості електроенергії з використанням миттєвого струму зворотної послідовності. За наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік миттєвий струм зворотної послідовності $i_2(t)$ в симетричному режимі містить п'яту гармоніку. За несиметричного режиму струм $i_2(t)$, містить струм першої та п'ятої гармонік, що зумовлений несиметрією навантажень. В симетричному

режимі струм нульової послідовності $i_0(t)$ містить третю гармоніку, в несиметричному за основною гармонікою – першу і третю, а в несиметричному за усіма гармоніками – усі гармоніки.

2. Струм $i_2(t)$, який характеризує несиметрію навантажень за основною гармонікою та несинусоїдність, що зумовлена наявністю гармонік, які утворюють зворотну послідовність, доцільно використовувати для виявлення нелінійних несиметричних споживачів, а для оцінювання рівня їх впливу – миттєві умовні потужності p_{i_2}, q_{i_2} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм зворотної послідовності. Для оцінювання вини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільчої мережі – миттєві умовні потужності p_{u_2}, q_{u_2} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу зворотної послідовності.

3. Для оцінювання впливу нелінійних та несиметричних споживачів, які зумовлюють появу струму нульової послідовності, доцільно використовувати миттєві умовні потужності p_{i_0}, q_{i_0} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм нульової послідовності, а для оцінювання вини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільчої мережі – миттєві умовні потужності p_{u_0}, q_{u_0} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу нульової послідовності.

4. Для оцінювання несиметричності споживачів доцільно використовувати середні значення умовних потужностей $P_{i_2}, Q_{i_2}, P_{i_0}, Q_{i_0}$, які однозначно характеризують несиметрію струмів фаз за основною гармонікою. Для оцінювання внеску споживачів в спотворення синусоїдної форми напруги доцільно використовувати середньоквадратичні значення умовних потужностей: $P_{ski_2}, Q_{ski_2}, P_{ski_0}, Q_{ski_0}$.

5. Проаналізовано несиметричні несинусоїдні режими трифазних

мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що умовні потужності нульової послідовності q_{β} і q_{α} , які є відповідно активною та реактивною умовними потужностями нульової послідовності, містять складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються відповідно постійною та змінною складовою.

6. Наявність першої гармоніки струму та напруги нульової послідовності формує постійну складову і другу гармоніку цих потужностей, а наявність третьої гармоніки струму та напруги – другу та четверту гармоніки цих потужностей.

7. Показано, що за наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей p_{i_2}, q_{i_2} та p_{i_0}, q_{i_0} зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності, що створюється напругою та струмом основної частоти прямої послідовності. Водночас збільшення p_{u_2}, q_{u_2} та p_{u_0}, q_{u_0} свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення нелінійних споживачів. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ

4.1 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням реактивної потужності

Аналіз чутливості виконується за наявності додаткових джерел спотворень, які приєднані разом з контрольованим споживачем до спільного вузла навантаження.

Спочатку проаналізуємо чутливість виявлення джерела спотворення за допомогою методу критичного імпедансу. На рис. 4.1 зображено залежності реактивної потужності від кута $\delta_{(n)}$ для двох випадків $\underline{Z}_{(n)c} = 0,002 + j0,05 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{(n)H} = 1 + j2,5 \text{ Ом}$, $\dot{J}_{(n)c} = 5e^{j0} \text{ А}$, $\dot{J}_{(n)H} = 5e^{j\delta_{(n)}} \text{ А}$ (крива 1) та $\dot{J}_{(n)H} = 1e^{j\delta_{(n)}} \text{ А}$ (крива 2).

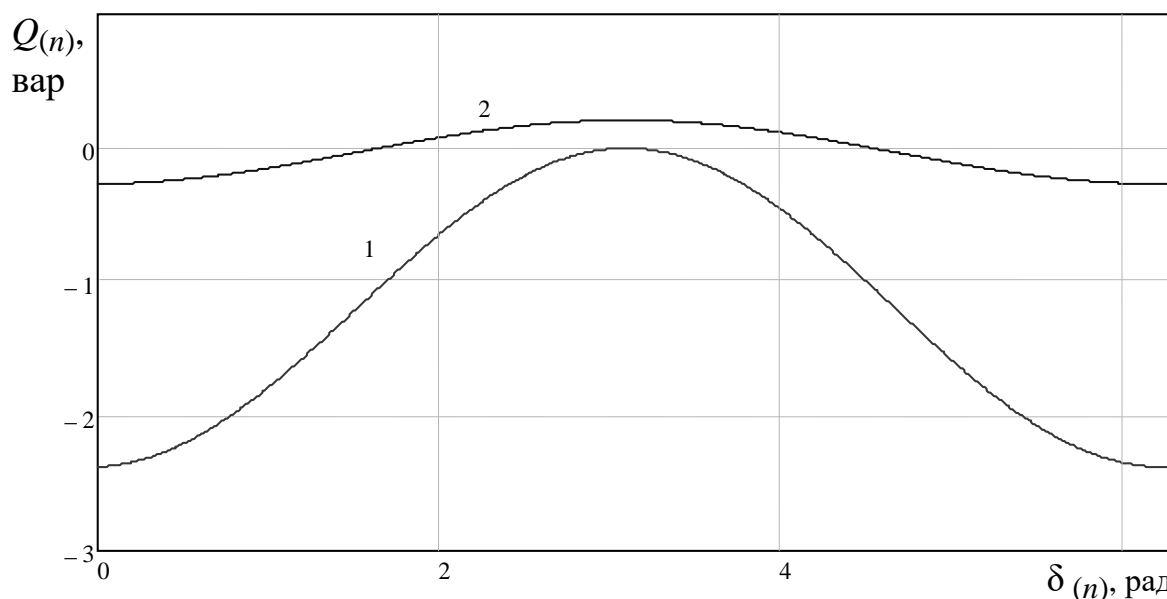


Рисунок 4.1 – Залежності реактивної потужностей від кута $\delta_{(n)}$ за рівного та малого струму спотворення навантаження відносно системи

Зі збільшенням значення модуля струму спотворення навантаження графіки переміщуються вниз, а зі зменшенням струму спотворення навантаження – графіки переміщуються вгору і стискаються.

На рис. 4.2 наведено залежності критичного імпедансу як функції кута $\delta_{(n)}$ для цих же двох випадків $\underline{Z}_{(n)c} = 0,002 + j0,05$ Ом, $\underline{Z}_{(n)H} = 1 + j2,5$ Ом, $\dot{J}_{(n)c} = 5e^{j0}$ А, $\dot{J}_{(n)H} = 5e^{j\delta_{(n)}}$ А (крива 1) та $\dot{J}_{(n)H} = 1e^{j\delta_{(n)}}$ А (крива 2).

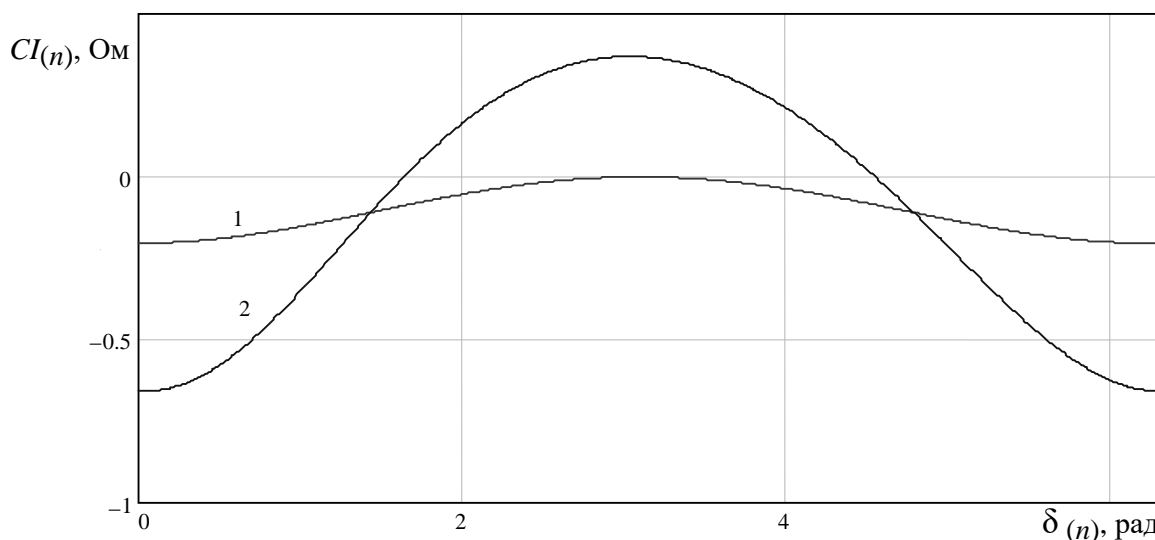


Рисунок 4.2 – Залежності критичного імпедансу від кута $\delta_{(n)}$ за рівного та малого струму спотворення навантаження відносно системи

Характерною особливістю критичного імпедансу та адмітансу є їх сталість у разі однакового співвідношення струмів спотворення навантаження і системи. Однак, оскільки графік 2, побудований за малого значення потужності спотворення навантаження, пересікає графік 1, побудований за великого струму спотворення навантаження, то за малих від'ємних значень CI або $Q_{(n)}$ в околі точки перетину залежностей зробити однозначні висновки про джерело спотворення не можна. Що стосується критичного адмітансу, то істотним недоліком є його різке збільшення за нульового значення напруги гармоніки.

Для отримання однозначної відповіді про джерело спотворення введемо реактивну потужність $Q_{(n)c} = I_{(n)}^2 X_{(n)c}$, яка наближено характеризує реактивну потужність, що генерується навантаженням і споживається в системі [85]. Розглянемо рис. 4.3, на якому зображено залежності реактивної потужності $Q_{(n)}$ від кута $\delta_{(n)}$ для двох випадків $Z_{(n)c} = 0,002 + j0,05$ Ом, $Z_{(n)H} = 1 + j2,5$ Ом, $J_{(n)c} = 5e^{j0}$ А, $J_{(n)H} = 6e^{j\delta_{(n)}}$ А (крива 1) та $J_{(n)H} = 1e^{j\delta_{(n)}}$ А (крива 2), а також залежності $Q_{(n)c}$ (криві 3 і 4) для цих же двох випадків.

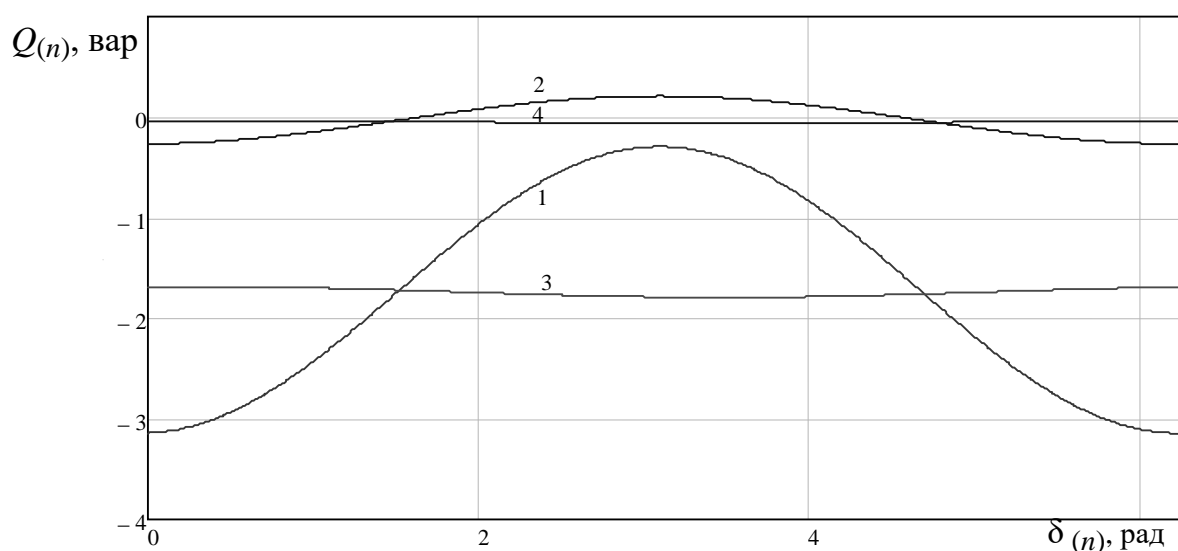


Рисунок 4.3 – Залежності реактивної потужності від кута $\delta_{(n)}$ за великого та малого струму спотворення навантаження відносно системи

Для малих від'ємних значень $Q_{(n)}$ можна ввести такі правила ідентифікації джерела спотворення: якщо $Q_{(n)} < Q_{(n)c}$, то споживач не спотворює якість електроенергії, якщо $Q_{(n)} > Q_{(n)c}$, то саме споживач є джерелом спотворення.

Отже, недоліком методу критичного імпедансу є можливість виявлення споживача, що спотворює якість електроенергії, у разі якщо $J_{(n)H} > J_{(n)c}$.

4.2 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням потужностей спотворень

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 5 % та 4 % від амплітуди струму основної гармоніки: $i_f = \sqrt{2}I_f (\sin \omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$, ($f = A, B, C$), що характерно для розподільчих мереж за наявності випрямлячів (переважають канонічні 5, 7, ... гармоніки). Потужність навантаження споживача на основній гармоніці: $\underline{S}_{n1} = 112,9 + j65,2$ кВ·А. Навантаження живиться через трансформатор потужністю 400 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник / зірка з нулем».

Проаналізуємо вплив сторонніх споживачів за симетричного (табл. 4.1) та несиметричного (табл. 4.2) навантаження для різних навантажень системи (решти споживачів): $\dot{J}_{(n)c} = k \cdot \dot{J}_{(n)n1}$, $k = [-2; 2]$ [86].

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків потужностей спотворень в симетричному режимі

Потужність решти споживачів (системи)	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	D , квар	N_p , кВт	N_q , квар	S_p , кВт	S_q , квар
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	105,7	64,5	65,0	7,9	8,0	4,9	8,0	4,9
$\dot{J}_{(n)c} = -1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	109,2	64,8	65,4	8,5	7,3	4,4	7,3	4,4
$\dot{J}_{(n)c} = 0$	112,9	65,2	65,7	7,6	7,9	4,6	7,9	4,6
$\dot{J}_{(n)c} = 1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	109,3	64,9	65,2	6,5	8,1	4,9	8,1	4,9
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	105,7	64,5	64,7	5,4	8,4	5,2	8,4	5,2

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків потужностей спотворень в несиметричному режимі

Потужність решти споживачів (системи)	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	D , квар	N_p , кВт	N_q , квар	S_p , кВт	S_q , квар
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	102,3	62,4	62,9	7,7	8,2	5,5	7,5	4,9
$\dot{J}_{(n)c} = -1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	105,7	62,7	63,2	8,2	7,6	5,2	6,8	4,4
$\dot{J}_{(n)c} = 0$	109,2	63,1	63,5	7,4	8,2	5,4	7,3	4,6
$\dot{J}_{(n)c} = 1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	105,8	62,8	63,1	6,3	8,4	5,6	7,6	4,8
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	102,3	62,4	62,7	5,3	8,6	5,7	7,8	5,1

З порівняння потужностей спотворень S_p , S_q з потужністю D можна прийти до висновку про їх надзвичайно високу відповідність. Зауважимо, що в симетричних режимах потужності S_p , S_q дорівнюють потужностям пульсацій N_p, N_q . Перевагою потужностей спотворень D , S_p , S_q є практична незалежність від несиметрії навантажень. Водночас недоліком потужності $D = \sqrt{Q^2 - Q_F^2}$ є її погана обумовленість визначення, оскільки незначні похибки вимірювання Q і Q_F істотно впливають на результат.

Проаналізуємо вплив компенсації реактивної потужності за симетричного (табл. 4.3) та несиметричного (табл. 4.4) навантаження для різних навантажень системи (решти споживачів): $\dot{J}_{(n)c} = k \cdot \dot{J}_{(n)n1}$, $k = [-1; 1]$ за практично повної компенсації реактивної потужності лінійного навантаження на основній гармоніці.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків потужностей спотворень в симетричному режимі

Потужність решти споживачів (системи)	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	D , квар	N_p , кВт	N_q , квар	S_p , кВт	S_q , квар
$\dot{J}_{(n)c} = -1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	130,0	1,9	6,5	6,2	6,1	1,5	6,1	1,5
$\dot{J}_{(n)c} = 1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	130,1	1,9	9,3	9,1	12,1	0,5	12,1	0,5

Таблиця 4.4 – Результати розрахунків потужностей спотворень в несиметричному режимі

Потужність решти споживачів (системи)	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	D , квар	N_p , кВт	N_q , квар	S_p , кВт	S_q , квар
$\dot{J}_{(n)c} = -1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	125,7	1,9	6,5	6,3	6,8	3,4	6,1	1,5
$\dot{J}_{(n)c} = 1 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	125,8	1,9	9,3	9,1	12,4	3,1	12,0	0,5

У разі компенсації реактивної потужності порівняно з попередніми результатами, які наведені в табл. 4.1 і табл. 4.2, значення потужностей спотворення D , N_p , S_p суттєво не змінилися, значення N_q , S_q зменшилися.

4.3 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей струмів і напруг

З наведених в розділі 3 результатів випливає, що для виявлення та оцінювання гармонічних спотворень споживачів, які джерелами вищих гармонік, можна використовувати середньоквадратичні значення $P_{скі_2}$, $Q_{скі_2}$ та $P_{скі_0}$, $Q_{скі_0}$, які визначають шляхом усереднення миттєвих потужностей, відповідно, p_{i_2} , q_{i_2} та $p_{i_0} = i_0 u_\alpha$, $q_{i_0} = -i_0 u_\beta$, а для оцінювання гармонічних

спотворень інших споживачів (системи) – середньоквадратичні потужності $P_{ски_2}, Q_{ски_2}$ та $P_{ски_0}, Q_{ски_0}$, для визначення яких використовуються миттєві потужності, відповідно, p_{u_2}, q_{u_2} та $p_{u_0} = -i_\alpha u_0, q_{u_0} = i_\beta u_0$. Середні значення цих же величин використовують для оцінювання несиметрії струмів і напруг на основній частоті за зворотною та нульовою послідовностями.

В табл. 4.5 наведено результати розрахунків середніх і середньоквадратичних потужностей зворотної послідовності за умов несинусоїдності для несиметричного режиму (для наведеного вище прикладу до компенсації реактивної потужності).

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків потужностей зворотної послідовності

Потужність решти споживачів (системи)	P_{2p} , кВт	Q_{2p} , квар	$P_{ск2p}$, кВт	$Q_{ск2p}$, квар	P_{2q} , кВт	Q_{2q} , квар	$P_{ск2q}$, кВт	$Q_{ск2q}$, квар
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	3,6	-2,1	4,6	3,5	3,6	-1,8	4,7	3,6

З порівняння результатів, що наведені в табл. 4.2 і табл. 4.5, випливає, що значення інтегральних умовних потужностей зворотної послідовності є співмірні з потужностями спотворень.

Розглянемо несинусоїдний симетричний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки струмів фаз: $i_f = \sqrt{2} I_f (\sin \omega t + 0,01 \sin 3\omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$, ($f=A, B, C$), що характерно для розподільчих мереж за наявності некерованих випрямлячів (переважають канонічні 5, 7, ... гармоніки). Потужність навантаження споживача на основній гармоніці: $\underline{S}_{n1} = 113 + j65$ кВт·А. Потужність навантаження системи (решти споживачів) на основній гармоніці: $\dot{J}_{(n)c} = \pm 2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$. Навантаження живиться через трансформатор

потужністю 400 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник / зірка з нулем».

В табл. 4.6 наведено значення умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей за різного співвідношення спотворень системи відносно споживача.

Таблиця 4.6 – Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H1} за переважання п'ятої та сьомої гармонік (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c}=0$	6,0	10,2	1,30	1,30	0,7	0,9	0,1	0,1
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	6,2	10,6	1,34	1,34	2,0	2,7	0,2	0,2
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	5,5	9,3	1,20	1,20	2,0	2,7	0,2	0,2

З табл. 4.6 видно, що значення показників $P_{ски2}, Q_{ски2}$ є досить значними, що зумовлено великим вмістом струму зворотної послідовності п'ятої гармоніки контрольованого споживача. Значними є і значення показників $P_{ски2}, Q_{ски2}$, що зумовлено струмом зворотної послідовності п'ятої гармоніки усіх споживачів. Значення показників $P_{ски0}, Q_{ски0}$ є помітно меншими, що зумовлено меншим вмістом струму нульової послідовності третьої гармоніки контрольованого споживача.

Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармоніки, яка є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Оскільки основою для формування струму зворотної та

нульової послідовності ϵ , відповідно, п'ята та третя гармоніки, то оцінки чутливості показників $P_{cki_2}, Q_{cki_2}, P_{cki_0}, Q_{cki_0}$ для споживача \underline{S}_{H1} будуть:

$$T_{Pi2} = \frac{P_{cki_2}}{K_{I(5)}S_{H1}} = \frac{5,5}{0,05 \cdot 130} = 0,85; T_{Qi2} = \frac{Q_{cki_2}}{K_{I(5)}S_{H1}} = \frac{9,3}{0,05 \cdot 130} = 1,43;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{cki_0}}{K_{I(3)}S_{H1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92; T_{Qi0} = \frac{Q_{cki_0}}{K_{I(3)}S_{H1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92,$$

де $K_{I(5)}, K_{I(3)}$ – коефіцієнти п'ятої та третьої ГС струмів навантаження.

У даному випадку чутливість ϵ високою для усіх показників. Для зворотної і нульової послідовностей можна ввести еквівалентні показники чутливості $T_{i2} = \sqrt{T_{Pi2}^2 + T_{Qi2}^2}$ та $T_{i0} = \sqrt{T_{Pi0}^2 + T_{Qi0}^2}$, які характеризують відношення середньоквадратичних значень умовних повних потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармоніки, яка є основою для формування струмів відповідних послідовностей. У даному випадку $T_{i2} = 1,66; T_{i0} = 1,30$.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження споживача має нелінійне навантаження, що містить третю, п'яту, сьому, дев'яту, одинадцяту, ... гармоніки, амплітуди яких становлять приблизно 7 %, 2 %, 0,5 %, 0,2 %, 0,08 %, ..., відповідно, від амплітуди основної гармоніки. Потужність навантаження: $\underline{S}_{H2} = 123,8 + j46,8 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Навантаження системи залишилося як в попередньому прикладі.

В табл. 4.7 наведено значення інформативних параметрів за нелінійного навантаження системи $\dot{J}_{(n)c} = \pm 2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$.

Таблиця 4.7 – Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} у разі більшого вмісту третьої гармоніки (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	2,9	2,6	9,7	9,7	1,3	1,8	0,5	0,5
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	2,6	1,7	9,8	9,8	1,3	1,7	0,5	0,5

З табл. 4.7 видно, що зі зменшенням вмісту п'ятої гармоніки умовні потужності зворотної послідовності $P_{ски2}, Q_{ски2}$ істотно зменшуються, а зі збільшенням вмісту третьої гармоніки умовні потужності нульової послідовності $P_{ски0}, Q_{ски0}$ істотно збільшуються. Значними є і значення показників $P_{ски2}, Q_{ски2}$, що зумовлено струмом зворотної послідовності п'ятої гармоніки сторонніх споживачів. Оцінимо чутливість:

$$T_{Pi2} = \frac{P_{ски2}}{K_{I(5)} S_{H2}} = \frac{2,6}{0,02 \cdot 132} = 0,98; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{ски2}}{K_{I(5)} S_{H2}} = \frac{1,7}{0,02 \cdot 132} = 0,64;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{ски0}}{K_{I(3)} S_{H2}} = \frac{9,7}{0,07 \cdot 132} = 1,05; \quad T_{Qi0} = \frac{Q_{ски0}}{K_{I(3)} S_{H2}} = \frac{9,7}{0,07 \cdot 132} = 1,05.$$

Чутливість показників $P_{ски2}, Q_{ски2}$ зменшилась, однак залишається достатньо високою $T_{i2} = 1,26$. Чутливість показників $P_{ски0}, Q_{ски0}$ збільшилась $T_{i0} = 1,48$.

За несиметричного режиму, наприклад, якщо струм фази С менший на 10 % від значення струмів інших фаз, середньоквадратичні значення практично не змінюються (струмові навіть дещо зростають) (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} за більшого вмісту третьої гармоніки і несиметричного несинусоїдного навантаження (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	4,6	3,9	10,8	8,9	1,3	1,8	0,5	0,5
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	4,3	3,4	11,0	9,1	1,2	1,6	0,5	0,5

В несиметричному режимі виникають постійні складові (табл. 4.9), які характеризують несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями на основній гармоніці. Водночас, як видно з табл. 4.9, на інформативні величини, що характеризують несиметричність навантаження рівень і характер гармонічних спотворень не впливають. Результати, які наведено в табл. 4.9, збігаються з результатами, які наведено в табл. 3.2, що зумовлено однакою характером несиметрії.

Таблиця 4.9 – Середні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} за більшого вмісту третьої гармоніки і несиметричного несинусоїдного навантаження (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	P_{i2}	Q_{i2}	P_{i0}	Q_{i0}	P_{u2}	Q_{u2}	P_{u0}	Q_{u0}
$\dot{J}_{(n)c} = \pm 2 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	3,6	-2,9	0,7	-4,6	0,1	-0,1	0,1	0

Розглянемо можливість збільшення спотворень сторонніх споживачів $\dot{J}_{(n)c} = \pm 10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$ за того ж навантаження на основній гармоніці $\dot{J}_{(1)c} = \pm 2 \dot{J}_{(1)H1}$ для споживача $\underline{S}_{H2} = 123,8 + j46,8$ кВ·А (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} у разі збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	4,0	5,1	9,4	9,4	6,8	10,6	1,0	1,0
$\dot{J}_{(n)c} = -10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	2,7	2,6	10,1	10,1	5,6	7,4	0,7	0,7

З порівняння результатів, наведених в табл. 4.10 і табл. 4.7, видно, чутливість усіх показників $P_{ски2}$, $Q_{ски2}$, $P_{ски0}$, $Q_{ски0}$ збільшилася незначно, що можна пояснити різним характером навантажень контрольованого споживача відносно решти споживачів.

Розглянемо можливість збільшення спотворень сторонніх споживачів $\dot{J}_{(n)c} = \pm 10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$ за того ж навантаження на основній гармоніці $\dot{J}_{(1)c} = \pm 2 \dot{J}_{(1)H1}$ для споживача $\underline{S}_{H1} = 113 + j65$ кВ·А (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H1} у разі збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	7,7	13,1	1,6	1,6	7,4	9,8	0,7	0,7
$\dot{J}_{(n)c} = -10 \cdot \dot{J}_{(n)H1}$	4,1	6,9	1,0	1,0	7,4	9,8	0,7	0,7

Оцінимо чутливість:

$$T_{Pi2} = \frac{P_{ски2}}{K_{I(5)} S_{H1}} = \frac{4,1}{0,05 \cdot 130} = 0,63; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{ски2}}{K_{I(5)} S_{H1}} = \frac{6,9}{0,05 \cdot 130} = 1,06;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{cki0}}{K_{I(3)}S_{H1}} = \frac{1,0}{0,01 \cdot 130} = 0,77; T_{Qi0} = \frac{Q_{cki0}}{K_{I(3)}S_{H1}} = \frac{1,0}{0,01 \cdot 130} = 0,77.$$

Чутливість усіх показників зменшилась, однак залишається достатньо високою. У даному випадку $T_{i2} = 1,23; T_{i0} = 1,09$. Зменшення чутливості пояснюється однакою характером спотворень споживача і системи, що призводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх.

Таким чином, метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10% і більше від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи) з достатньою чутливістю.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Для визначення струмів n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)n}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ можна використати вимірювання напруг $\dot{U}_{(n)}$, струмів $\dot{I}_{(n)}$, активної $P_{(n)}$ та реактивної $Q_{(n)}$ потужностей окремих ГС, однак чутливість таких методів і, зокрема, методу критичного імпедансу, обмежується відношенням $|\dot{J}_{(n)n}| > |\dot{J}_{(n)c}|$.

2. Проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармонічного складника, який є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Показано,

що чутливість є досить високою для всіх показників. Несиметрія навантажень не знижує чутливості методу.

3. Використання середніх значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей дозволяє виявити споживачів, які мають несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (системи) не впливає на чутливість для споживачів з різним характером спотворень. Деяке зменшення чутливості відбувається для споживачів з однаковим характером спотворень споживача і системи, що призводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх. При цьому чутливість залишається високою ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). Показано, що метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10% і більше від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи).

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА АСКОЕ З ФУНКЦІЄЮ ВИЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1 Структурна схема АСКОЕ з виявленням споживачів, які спотворюють якість електроенергії

Різноманітним аспектам побудови систем моніторингу ЯЕ присвячена значну кількість робіт [87]-[91].

В дисертаційній роботі розроблено програмно-апаратний комплекс системи АСКОЕ, що призначений для вимірювання та обліку кількості електричної енергії, автоматичного збору, обробки, зберігання і відображення отриманих даних, статистичного контролю якості електроенергії, моніторингу стану об'єкта і засобів вимірювань, оперативного диспетчерського та автоматичного контролю і управління з функцією виявлення та оцінювання джерел спотворення електроенергії (рис. 5.1).

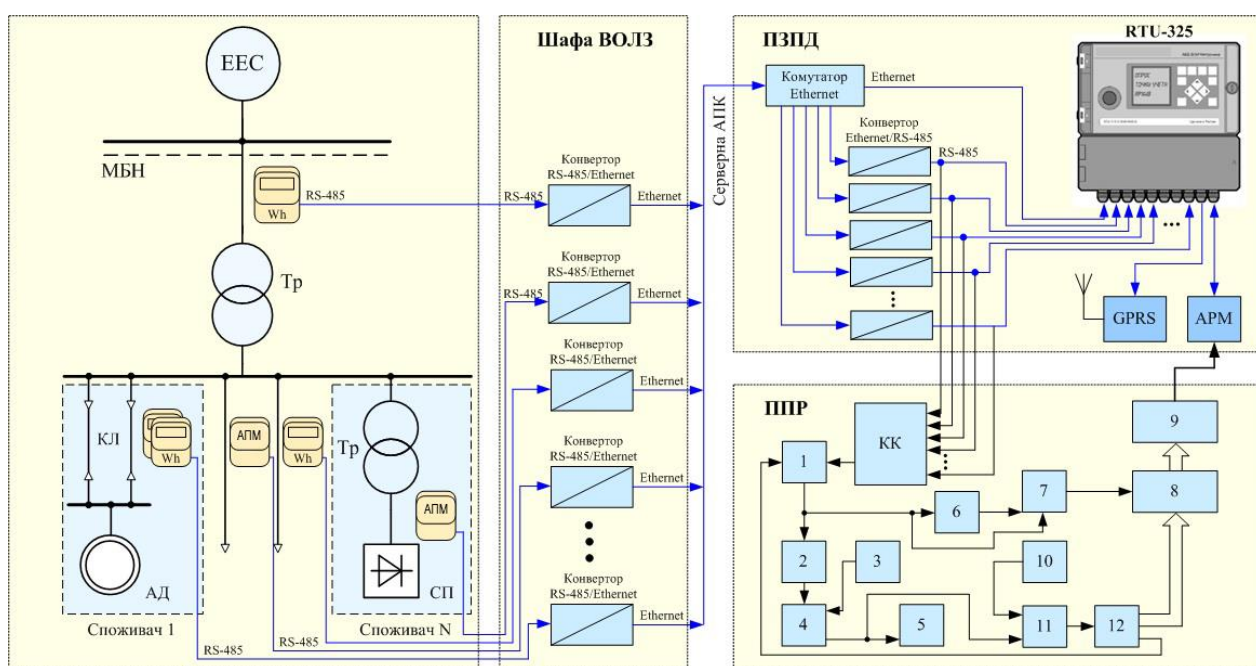


Рисунок 5.1 – Структурна схема АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів

До складу програмно-апаратного комплексу системи АСКОЕ входять наступні технічні засоби:

- пристрої збору, обробки та передачі даних, (аналізатори параметрів мережі, лічильники електроенергії, цифрові та аналогові вимірювальні перетворювачі активної і реактивної потужності, фазних і лінійних напруг, фазних струмів, частоти, що мають стандартний вихід по струму і напрузі);

- пристрій синхронізації системного часу на основі GPS-приймача;

- перетворювачі інтерфейсів передачі даних Ethernet, RS-232, RS-485, RS-422;

- засоби передачі даних (модеми, радіомодеми, GSM-модеми, перетворювачі і повторювачі сигналів для оптоволоконних каналів зв'язку);

- сервер баз даних;

- АРМ на базі персонального комп'ютера.

Система АСКОЕ виконує такі функції:

- автоматизований збір і зберігання результатів вимірювань

- автоматична діагностика стану засобів вимірювальної техніки і об'єктів обліку;

- обробка результатів вимірювань (обробка повноти та достовірності) та візуальне представлення, інформації в табличному і графічному вигляді;

- формування і друк звітних документів;

- передача інформації в контролюючі та зацікавлені організації;

- інтеграція з зовнішніми системами;

- підтримка єдиного системного часу.

На схемі позначено:

ЕЕС – електроенергетична система;

АД – асинхронний двигун (символізує навантаження у вигляді обертових виконавчих механізмів / машин змінного струму);

СП – силові напівпровідникові перетворювачі (споживачі – найпоширеніші джерела вищих гармонік);

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;

ПЗПД – підсистема зберігання та передачі даних;

RTU-325 – пристрій збору та передачі даних, який призначений для збору, обробки, зберігання даних, зібраних з лічильників електроенергії, і передачі їх на верхній рівень. Відрізняються типом контролера, його потужністю, конструктивним виконанням і кількістю цифрових інтерфейсів і імпульсних каналів;

ППР – підсистема прийняття рішень щодо спотворення ЯЕ;

КК – комутатор каналів (каналів опитування точок обліку споживачів);

АРМ – автоматизоване робоче місце;

GPRS – модем стандарту GSM/GPRS.

Підсистема прийняття рішень складається з таких елементів:

1 – аналізатор спектра;

2 – блок обчислення коефіцієнта гармонічних спотворень K_U ;

3 – задавач нормованого допустимого значення $K_{U \text{ доп.}}$;

4 – блок порівняння;

5 – блок індикації;

6 - блок виділення амплітуди превалюючої гармоніки напруги N

споживача;

7 – блок визначення та запам'ятовування частоти превалюючої гармоніки;

8 – Блок запам'ятовування рівнів спотворення споживачів;

9 – блок узгодження;

10 – генератор тактових імпульсів;

11 - елемент "Г";

12 – розподілювач тактів .

Синтезований пристрій в якості критерія оцінки якості електроенергії використовує коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги.

В даному пристрої аналізатор 1 спектра розкладає сигнал, який почергово надходить від кожного з вимірювальних каналів точок обліку електроенергії через комутатор каналів в ряд Фур'є із частотами, які є кратними основній частоті струму в мережі, рівній 50 Гц.

Отриманий на виході аналізатора 1 спектр напруги мережі надходить на входи блока 2 обчислення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги та блока 6 виділення амплітуд превалюючих вищих гармонік. В блоці 2 на основі отриманих значень амплітуд вищих гармонік спектра напруги обчислюється значення реального K_U мережі та порівнюється із нормованим гранично допустимим значенням цього коефіцієнта від задавача 3. В блоці 6 шляхом попарного порівняння амплітуд визначається амплітуда превалюючої вищої гармоніки, яка задає основне спотворення якості електричної енергії. В блоці 7 визначення та запам'ятовування частоти превалюючої вищої гармоніки по сигналу керування з блока 6 фіксується частота превалюючої гармонічної складової.

У випадку, коли гармонічний спектр напруги знаходиться в межах норми та коефіцієнт несинусоїдальності не перевищує встановленого ГОСТ 13109-97 значення, пристрій перебуває в стані очікування, постійно аналізуючи спектр напруги мережі. В разі перевищення окремими гармоніками напруги мережі нормованих величин коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги досягає недопустимих значень, про що свідчать покази блоку 5 індикації стану. Елемент порівняння формує сигнал про перевищення $K_{нс}$ встановленого значення, який надходить на елемент "Г", тим самим дозволяючи проходження тактових імпульсів від генератора 10 тактових імпульсів на вхід розподільвача тактів 12. Блок 12 формує сигнал керування, який надходить на один з входів аналізатора 1 спектра, що свідчить про готовність блока 12 до роботи та необхідність оновлення спектра напруги мережі.

В блоках 1, 6 і 7 визначається амплітуда превалюючої вищої гармоніки (рівень спотворення) та фіксується її частота, після чого отриманий сигнал надходить в блок пам'яті 8. Вихідний сигнал блока пам'яті, який містить інформацію про частоту превалюючої вищої гармоніки (рівень спотворення якості) по конкретній точці обліку споживання, по сигналу керування розподільвача тактів 12 надходить через блок узгодження (АЦП) на АРМ оператора для відображення та прийняття подальшого рішення щодо спільної роботи споживачів, які функціонують на підприємстві.

Основною вимірювальною інформацією є миттєві значення напруг і струмів, на основі яких отримуються діючі значення і будуються векторні діаграми. На рис. 5.2 показані залежності діючих значень струмів, а на рис. 5.3 – векторні діаграми напруг і струмів.

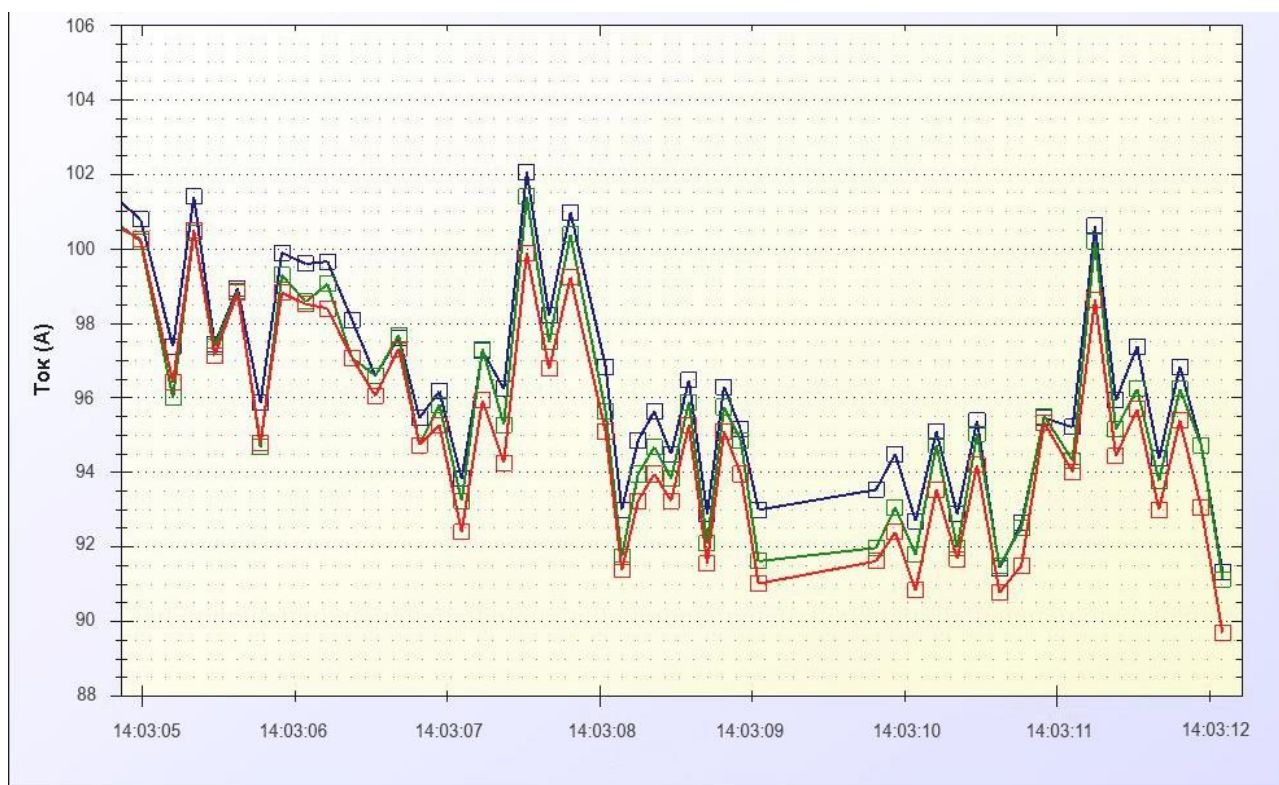


Рисунок 5.2 – Залежності діючих значень струму

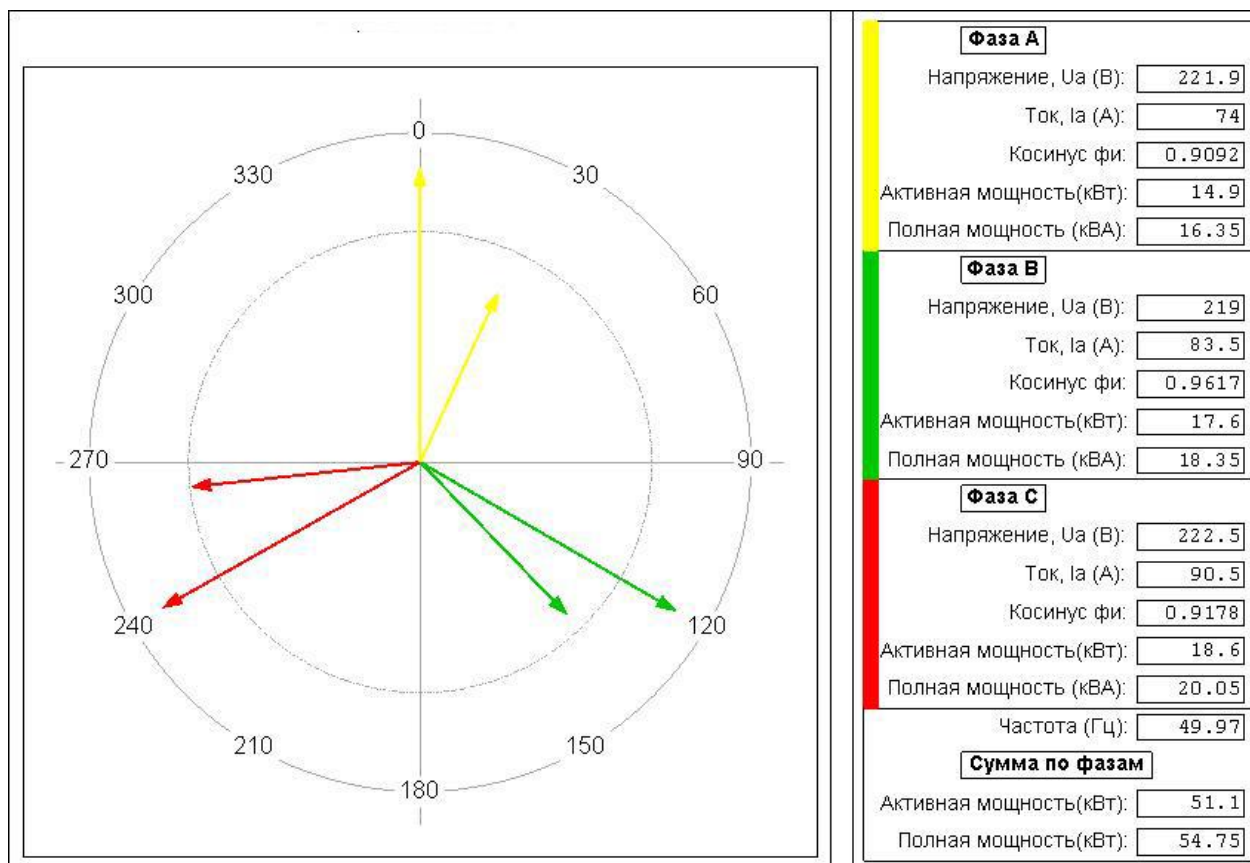


Рисунок 5.3 – Векторні діаграми напруг і струмів

5.2 Вимірювання умовних потужностей зворотної послідовності в динамічних режимах

В [92] розроблено спосіб для отримання інформації про дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, при побудові яких використано підхід, що оснований на усередненні на періоді або на половині періоду:

$$P_{2(T)}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_2(t) dt; \quad Q_{2(T)}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t q_2(t) dt; \quad (5.1)$$

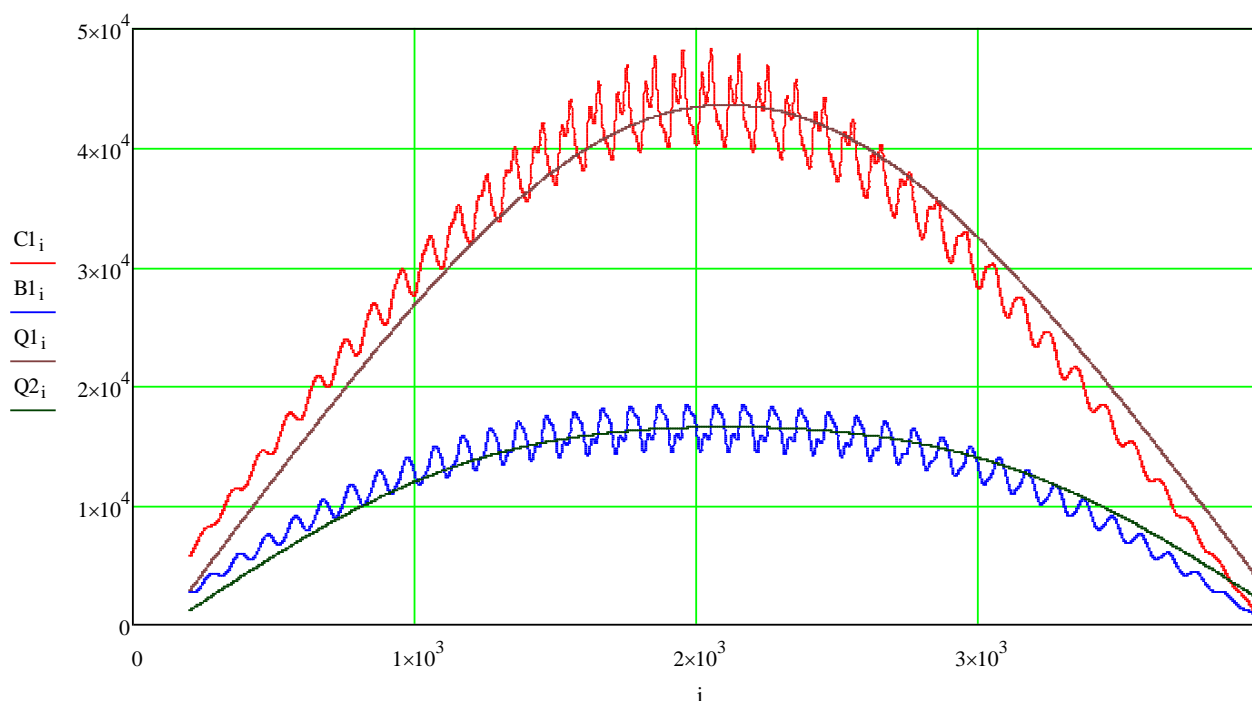
$$P_{2(T/2)}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t p_2(t) dt; \quad Q_{2(T/2)}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t q_2(t) dt. \quad (5.2)$$

Однак в обох випадках виникає динамічна похибка, яка залежить від швидкості зміни навантаження. Динамічна похибка у разі застосування алгоритму (5.2) наведена на рис. 5.4.

Найпростішим способом корекції є визначення активної та реактивної потужностей навантаження за формулами [93]:

$$P_2(t) = 2 \cdot P_{2(T/2)}(t) - P_{2(T)}(t); \quad Q_2(t) = 2 \cdot Q_{2(T/2)}(t) - Q_{2(T)}(t). \quad (5.3)$$

У цьому випадку алгоритм забезпечує практично повну компенсацію



динамічної похибки за швидкозмінних навантажень (рис. 5.5).

Рисунок 5.4 – Динамічна похибка у разі застосування алгоритму (5.2)

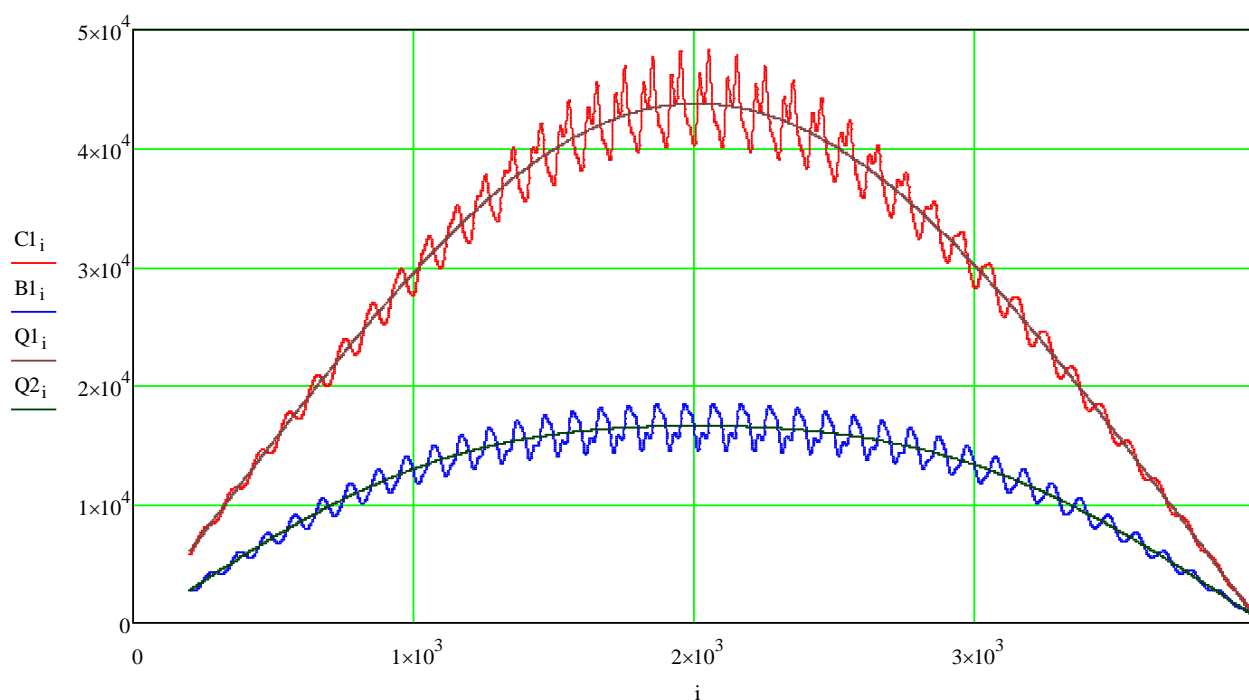


Рисунок 5.5 – Динамічна похибка у разі застосування алгоритму (5.3)

На рис. 5.6 зображено структурну схему вимірювального каналу зворотної послідовності з вимірюваними величинами p_{i_2} , q_{i_2} та p_{u_2} , q_{u_2} .

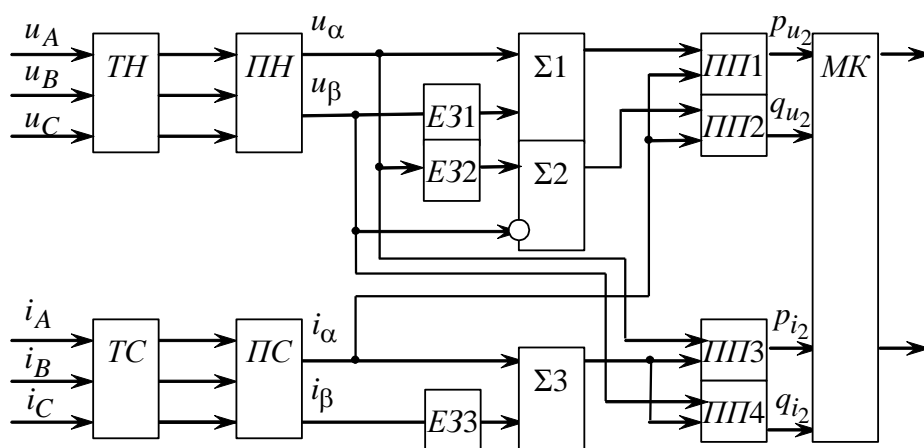


Рисунок 5.6 – Структурна схема вимірювального каналу зворотної послідовності

Вимірювальний канал складається з трансформатора напруги $TН$, трансформаторів струму $ТС$, перетворювача фазних напруг $ПН$, перетворювача фазних струмів $ПС$, елементів затримки $E31–E33$, суматорів $\Sigma1–\Sigma3$, перетворювачів потужності $ПП1, \dots, ПП4$, мікроконтролера $МК$.

В основу реалізації вимірювального каналу покладено формули (3.11), (3.12), які можуть бути визначені шляхом затримки в часі миттєвих значень струмів і напруг на чверть періоду [94]:

$$\begin{aligned}\hat{p}_{i_2}(t) &\approx 0,5(u_{\alpha}(t) - u_{\beta}(t - T/4))(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{i_2}(t) &\approx 0,5(u_{\alpha}(t - T/4) + u_{\beta}(t))(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4));\end{aligned}\quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\hat{p}_{u_2}(t) &\approx 0,5(u_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t - T/4))(i_{\alpha}(t) - i_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{u_2}(t) &\approx 0,5(u_{\alpha}(t - T/4) - u_{\beta}(t))(i_{\alpha}(t) - i_{\beta}(t - T/4)).\end{aligned}\quad (5.5)$$

Вирази (5.4), (5.5) для зручності реалізації спрощено:

$$\begin{aligned}\hat{p}_{i_2}(t) &\approx u_{\alpha}(t)(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{i_2}(t) &\approx u_{\beta}(t)(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4));\end{aligned}\quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}\hat{p}_{u_2}(t) &\approx i_{\alpha}(t)(u_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{u_2}(t) &\approx i_{\alpha}(t)(u_{\alpha}(t - T/4) + u_{\beta}(t)).\end{aligned}\quad (5.7)$$

Динамічні похибки для миттєвої потужності p_{i_2} за несиметричних струмів фаз (рис. 3.7), що зумовлені використанням затримки в часі у разі визначення \hat{p}_{i_2} , відображені на рис. 5.7. Середньоквадратичні значення збільшились, середні – не змінилися. Для інших миттєвих потужностей результати схожі.

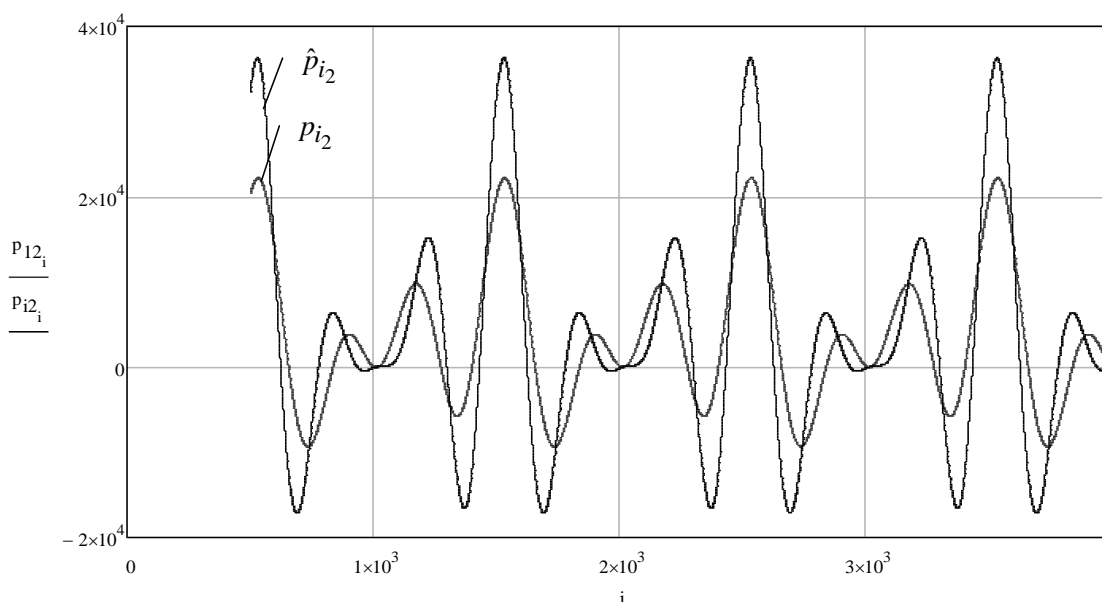


Рисунок 5.7 – Залежності p_{i_2} та \hat{p}_{i_2} за несинусоїдних та несиметричних струмів фаз

5.3 Статистичний контроль якості електроенергії з використанням економічного критерію оптимальності

При масовому контролі показників ЯЕ важливим інструментом є застосування статистичного контролю, який дає можливість при мінімальних витратах забезпечити оптимальний рівень контролю [95]. Дуже часто при цьому, з технічної точки зору, більш ефективним є контроль за кількісною ознакою [96]-[98] із-за значного зменшення обсягу вибірки і більшої інформативності. Але це ще не значить, що застосування контролю за кількісною ознакою буде ефективним з економічної точки зору. Тому необхідно оптимізувати план контролю в кожному конкретному випадку. Розглянемо можливі шляхи вирішення цієї проблеми.

Найбільш оптимальним можна вважати план контролю, оптимізацію якого виконано за економічним критерієм у вигляді максимуму прибутку від контролю. Доходом від контролю будемо вважати різницю між витратами без контролю і витратами при застосуванні контролю. Прибуток

визначатимемо як різницю між доходом і витратами на контроль. План контролю, що забезпечує максимум прибутку, і буде оптимальним.

Оскільки ефективність плану контролю визначається скороченням витрат, розглянемо два випадки [99]: за значної кількості споживачів і за невеликої кількості споживачів. Втрати будуть полягати у витратах виробничого характеру у разі отримання неякісної електроенергії.

Для вирішення проблем необхідно визначити середню частку неякісної електроенергії без контролю $\bar{q}_{вх}$. Цю величину можна визначити статистичними методами або за виразом:

$$\bar{q}_{вх} = \int_{x_1}^{x_2} \Phi_{вх}(x) dx, \quad (5.8)$$

де $\Phi_{вх}(x)$ – закон розподілу (щільність ймовірності) контрольованого параметра якості електроенергії; x_1 , x_2 – границі поля допуску контрольованого параметра.

Аналогічно визначається середня неякісної електроенергії за наявності контролю:

$$\bar{q}_{вих} = 1 - \int_{x_1}^{x_2} \Phi_{вих}(x) dx, \quad (5.9)$$

де $\Phi_{вих}(x)$ – закон розподілу (щільність ймовірності) контрольованого параметра якості електроенергії.

Далі оптимальний план контролю визначається аналогічно, як і для випадку контролю за альтернативною ознакою [99]. Таким чином, проблема полягає у визначенні $\Phi_{вх}(x)$ та $\Phi_{вих}(x)$. Перший вираз визначається статистичними методами. Найчастіше – це вираз для нормального закону розподілу. При цьому математичне очікування μ збігається з серединою

поля допуску x_0 , а дисперсія σ^2 визначається статистичними методами за значний проміжок часу.

Другий вираз визначається також як нормальний закон розподілу, але з меншою дисперсією. Зменшення дисперсії відбувається внаслідок забракування партій продукції в порядку введення приймального контролю переважно зі значним відхиленням математичного очікування. Згідно з правилами математичної статистики функція розподілу щільності ймовірності значень математичного очікування буде мати вигляд:

$$f_{vx}(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\mu} \exp\left\{-\frac{(\mu_0 - \mu)^2}{2\sigma_\mu^2}\right\}, \quad (5.10)$$

де $\sigma_\mu^2 = \sigma^2 - \sigma_0^2$; σ_0^2 – дисперсія контрольованого параметра при відсутності відхилень математичного очікування; $\mu_0 = x_0$ – математичне очікування контрольованого параметра за тривалий час.

Тоді

$$f_{vix}(\mu) = f_{vx}(\mu)L(\mu), \quad (5.11)$$

де $L(\mu)$ – оперативна характеристика плану контролю:

$$L(\mu) = 1 - \int_{x_{ГБН}}^{x_{ГБВ}} \varphi_x^-(x) dx. \quad (5.12)$$

Згідно з правилами математичної статистики

$$\varphi_x^-(x) = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left\{-\frac{(\mu - x)^2 n}{2\sigma_0^2}\right\}. \quad (5.13)$$

Оскільки $x_{ГБН} = x_0 - \Delta x_{ГБ}$ та $x_{ГБВ} = x_0 + \Delta x_{ГБ}$, то вираз для прибутку буде функцією двох змінних: $\Delta x_{ГБ}$ та n . Досліджуючи цей вираз на

максимум, знайдемо оптимальні значення границь бракування та обсягу вибірки.

У другому випадку встановлюється граничне значення частки дефектних виробів для партій задовільної якості q_G , відповідно до якого визначається гранично-допустиме відхилення математичного очікування $\Delta\mu_G$. Оскільки середнє арифметичне є незміщеною оцінкою математичного очікування, то границі бракування визначаються за виразами:

$$x_{ГБН} = x_0 - \Delta\mu_G; \quad (5.14)$$

$$x_{ГБВ} = x_0 + \Delta\mu_G; \quad (5.15)$$

Тобто, для встановлення оптимального плану контролю необхідно визначити лише обсяг вибірки. Але у вираз для прибутку необхідно, крім витрат на заміну дефектних виробів, додати витрати на штрафи. Для цього необхідно записати вираз для частки партій незадовільної якості, що потрапляють до споживача у випадку відсутності контролю і при його функціонуванні. При відсутності контролю ця частка буде:

$$q_{ПНЯ1} = 1 - \int_{\mu_0 - \Delta\mu_G}^{\mu_0 + \Delta\mu_G} f_{ex}(\mu) d\mu = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\mu} \int_{\mu_0 - \Delta\mu_G}^{\mu_0 + \Delta\mu_G} \exp\left\{-\frac{(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma_\mu^2}\right\} d\mu; \quad (5.16)$$

при функціонуванні контролю

$$q_{ПНЯ1} = 1 - \int_{\mu_0 - \Delta\mu_G}^{\mu_0 + \Delta\mu_G} f_{вих}(\mu) d\mu. \quad (5.17)$$

Деякі електричні параметри виробів електронної техніки не відповідають нормальному закону розподілу. Це параметри, які мають, як правило, одностороннє обмеження поля допуску [100]. До таких параметрів відносяться зворотні струми Р-П переходів, струми просочування, зокрема струми затвора польових транзисторів, крутизна характеристики польових транзисторів тощо. Маючи метод планування контролю, при відповідності

нормальному закону, можна трансформувати його для контролю згаданих параметрів. Для цього можна скористатися тим, що відносно модального значення параметра закон розподілу відповідає нормальному закону так, що нижче і вище модального значення половини розподілу мають різні дисперсії [101]. Використовують ту дисперсію, яка відповідає встановленій границі поля допуску. При цьому за математичне очікування приймають модальне значення:

$$\mu_0 = M_0. \quad (5.18)$$

Отже, для отримання максимального прибутку від застосування статистичного контролю за кількісною ознакою необхідно спочатку переконатися, що контроль взагалі потрібен (з економічної точки зору). Далі, якщо ж контроль дійсно потрібен, необхідно розробити такий план контролю, який би давав максимум прибутку при найбільш можливій ефективності.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Практично реалізовано АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

2. Запропоновано спосіб коректування динамічних похибок і розроблено структурну схему вимірювального каналу зворотної послідовності.

3. Запропоновано економічний критерій ефективності контролю якості електроенергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення чутливості виявлення джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. Проаналізовано можливості визначення потужностей в несинусоїдних несиметричних режимах трифазних мереж з використанням ортогональних складників миттєвих потужностей. Показано, що в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж пульсуюча потужність містить два складники, які зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів. Складники, що зумовлені несиметрією, представлено миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності. Миттєві потужності, що зумовлені несинусоїдністю, визначено як різницю пульсуючої потужності та миттєвої умовної потужності зворотної послідовності.

2. Отримано вирази для визначення пульсуючої потужності, потужності спотворення, потужностей зворотної послідовності, потужностей зворотної послідовності, що зумовлені окремо струмом і напругою зворотної послідовності, в інтегральній формі запису, які рекомендовано використовувати в процесі вимірювання. Отримано вирази для визначення потужності спотворення в спектральній формі запису. У відповідності з цими виразами комплексні значення потужності спотворення визначають шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки (за наявності першої, п'ятої та сьомої гармонік напруги та струму) миттєвих активної та реактивної складових потужності спотворення на періоді T напруги живлення.

3. На основі теорії миттєвої потужності проаналізовано несиметричні несинусоїдні режими трифазних мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що умовні потужності нульової послідовності q_{β} і q_{α} , які є відповідно

активною та реактивною умовними потужностями нульової послідовності, містять складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються відповідно постійною та змінною складовою. Наявність першої гармоніки струму та напруги нульової послідовності формує постійну складову і другу гармоніку цих потужностей, а наявність третьої гармоніки струму та напруги – другу та четверту гармоніки цих потужностей. Миттєві умовні потужності q_{β} і q_{α} пропонується розділити на миттєві умовні потужності $q_{\beta i_0}, q_{\alpha i_0}$, які визначаються струмом нульової послідовності, та миттєві умовні потужності $q_{\beta u_0}, q_{\alpha u_0}$, які визначаються напругою нульової послідовності.

4. Проаналізована можливість виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) на якість електроенергії трифазних мереж з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності. Такими джерелами є випрямлячі, частка яких в загальному навантаженні з кожним роком зростає. На основі теорії миттєвої потужності виділено миттєві умовні потужності p_{i_2}, q_{i_2} , що є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм зворотної послідовності, які дозволяють характеризувати вплив нелінійних споживачів на погіршення якості електроенергії, а для оцінювання вини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільчої мережі – миттєві умовні потужності p_{u_2}, q_{u_2} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу зворотної послідовності.

5. Для оцінювання впливу нелінійних та несиметричних споживачів, які зумовлюють появу струму нульової послідовності, доцільно використовувати миттєві умовні потужності p_{i_0}, q_{i_0} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм нульової послідовності, а для оцінювання вини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільчої мережі – миттєві умовні потужності

P_{u_0}, Q_{u_0} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу нульової послідовності. Формування цих величин здійснюється з використанням системи $\alpha, \beta, 0$ -координат, що істотно спрощує побудову вимірювальних пристроїв.

6. Показано, що за наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей P_{i_2}, Q_{i_2} та P_{i_0}, Q_{i_0} зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності, що створюється напругою та струмом основної частоти прямої послідовності. Водночас збільшення P_{u_2}, Q_{u_2} та P_{u_0}, Q_{u_0} свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення нелінійних споживачів. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин.

7. Проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармонічного складника, який є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Показано, що чутливість є досить високою для всіх показників. Несиметрія навантажень не знижує чутливості методу.

8. Використання середніх значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей дозволяє виявити споживачів, які мають несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (системи) не впливає на чутливість для споживачів з різним характером спотворень. Деяке зменшення чутливості відбувається для споживачів з однаковим характером спотворень

споживача і системи, що призводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх. При цьому чутливість залишається високою ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). Показано, що метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10% і більше від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи).

9. Практично реалізовано АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

Одержані наукові результати а саме: метод виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії впроваджено в ПП „Промавтоматика”, що підтверджено актом про впровадження від 07.02.2019 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 17.06.2019 р.

Результати теоретичного дослідження підтверджуються отриманими результатами експериментального дослідження в межах допустимої розбіжності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] „Правила присоединения потребителя к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии,” *Главгосэнергонадзор*, 1991.
- [2] “Review of methods for measurement and evaluation of the harmonic emission level from an individual distorting load,” CIGRE 36.05 / CIRED 2 Joint WGCC02 (Voltage Quality), 1999.
- [3] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, J. W. Resende, and M. S. Miskulin, “Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1721–1726, 1991.
- [4] H. Yang, P. Pirotte, and A. Robert, “Assessing the harmonic emission level from one particular customer,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Power Quality: End-Use Applicat. Perspectives*, Amsterdam, The Netherland, 1994, B-2.08.
- [5] В. Я. Майер, „Методика определения долевого вклада потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии,” *Электричество*, № 49, с. 19–24, 1994.
- [6] M. Tsukamoto, I. Kouda, Y. Natsuda, Y. Minowa, and S. Nishimura, “Advanced method to identify harmonic characteristic between utility grid and harmonic current sources,” in *Proc. 8th Int. Conf. Harmonics Quality Power*, Athens, Greece, 1998, pp. 419–425.
- [7] E. Thunberg and L. Soder, “A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 272–277, 1999.
- [8] T. Tayjasanant, C. Li, and W. Xu, „A resistance sign-based method for voltage sag source detection,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2554–2551, 2005.
- [9] Z. Hanzelka, P. Słupski, K. Piątek, Y. Varetsky, and M. Zieliński, „Single-point methods for location of distortion, unbalance, voltage fluctuation and

dips sources in a power system,” *Power quality – monitoring, analysis and enhancement*, Rijeka : InTech, – eISBN: 978-953-307-330-9, pp. 157–198, 2011.

[10] С. И. Гамазин, и В. А. Петрович, „Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии,” *Промышленная энергетика*, № 1, с. 32–38, 2003.

[11] Е. И. Васильев, „Определение фактического вклада потребителей и системы в несинусоидальность напряжения на основе активных экспериментов,” автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.09.03, Москва, 2008.

[12] И. Е. Васильев, Р. В. Клюев, и Е. И. Васильев, „Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения предприятий цветной металлургии на основе активного эксперимента – включения трансформаторов на параллельную работу,” *Аудит и финансовый анализ*, № 4, с. 464–467, 2011.

[13] Бунтеев Ю.Е. „Оценка определяющего влияния источников высших гармоник на качество электрической энергии в электротехнических комплексах промышленных предприятий,” автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.09.03, Санкт-Петербург. 2016.

[14] А. Н. Висящев, и С. Г. Тигунцев, „Влияние потребителей на искажение напряжения,” *Электрические станции*, № 7, с. 26–31, 2002.

[15] С. Г. Тигунцев, „Оценка вклада участников электроснабжения в качество электрической энергии,” в *Сборник трудов Международной научно-практической конференции Управление качеством электрической энергии «Power Quality Management»*, Л. И. Коверниковой, И. И. Карташева, В.Н. Тульского, Ю. В. Шарова, Б. В. Олексюка, Ред. Москва, Россия : ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2014, с. 199–207.

[16] А. Н. Висящев, Д. С. Федосов, и В. В. Федчишин, „Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети,” в *Сборник трудов Международной научно-практической конференции Управление качеством электрической*

энергии «*Power Quality Management*», Л. И. Коверниковой, И. И. Карташева, В.Н. Тульского, Ю. В. Шарова, Б. В. Олексюка, Ред. Москва, Россия : ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2014, с. 209–216.

[17] Д. С. Федосов, „Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети,” автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.14.02, Иркутск, 2014.

[18] Ф. А. Зыкин, „Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии,” *Электричество*, № 12, с. 5–9, 1987.

[19] Ф. А. Зыкин, „Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии,” *Электричество*, № 11, с. 13–19, 1992.

[20] Ю. С. Крайчик, и В. Н. Никифорова, „Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии,” *Электричество*, № 11, с. 72–74, 1993.

[21] Г. Сендерович, „Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії,” автореф. дис. докт. техн. наук, спец. 05.14.02, Донецьк, 2012.

[22] L. S. Czarnecki, „Current and power equations at bidirectional flow of harmonic active power in circuits with rotating machines,” *ETEP*, no. 1, pp. 45–52, 1993.

[23] M. Depenbrock, „Some remarks to active and fictitious power in polyphase and single-phase systems,” *ETEP*, no.1, pp. 15–19, 1993.

[24] A. Ferrero, G. Superti-Furga, „A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, pp. 568–577, 1991.

[25] A. Ferrero, A. P. Morando, R. Ottoboni, and G. Superti-Furga, „On the meaning of the Park power components in the three-phase systems under nonsinusoidal conditions,” *ETEP*, no. 1, pp. 33–43, 1993.

[26] L. Cristaldi, and A. Ferrero, „A digital method for the identification of the source of distortion in electric power systems,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 1, pp. 14–16, 1994.

[27] L. Cristaldi, and A. Ferrero, „A Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 3, pp. 683–685, 1995.

[28] В. Н. Никифорова, и А. Н. Лушнова, „Метод определения фактического вклада субъекта, имеющего искажающие электроприемники, обусловившие несоответствие показателей качества электроэнергии,” *Технологии электромагнитной совместимости*, № 1 (4), 2002.

[29] W. Xu, Xian Liu and Y. Liu, „An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 214-219, 2003.

[30] C. Li, W. Xu and T. Tayjasant „A “Critical Impedance” – Based Method for Identifying Harmonic Sources,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 671–678, 2004.

[31] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, and T. Tayjasant, “Critical impedance method – a new detecting harmonic sources method in distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 288–297, 2004.

[32] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, „A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 1782–1789, 2007.

[33] D. Stevanović, and P. Petković, „A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system,” *Metrology and Measurement Systems*, vol. XXI, no. 1, pp. 3–14, 2014.

[34] D. Stevanović, and P. Petković, „A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters,” *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165-174.

[35] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf.

[36] R. Lin, L. Xu and X. Zheng, „A Method for Harmonic Sources Detection based on Harmonic Distortion Power Rate,” in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, no. 322, 2018. doi:10.1088/1757-899X/322/7/072038.

[37] С. С. Смирнов, и Л. И. Коверникова, „Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети,” *Электричество*, № 1, с. 56–64, 1996.

[38] С. С. Смирнов, „Метод определения фактического вклада сети и потребителя в коэффициенты высших гармоник напряжения узла,” *Электричество*, № 10, с. 54–61, 2005.

[39] С. С. Смирнов, *Высшие гармоники в сетях высокого напряжения*. Новосибирск, Россия: Наука, 2010.

[40] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, та П. Г. Щербакова, „Науково-технічні аспекти визначення відповідальності за порушення якості електричної енергії,” *Стандартизація, сертифікація, якість*, № 6, с. 48-55, 2013.

[41] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, та П. Г. Щербакова, „Особенности визначення часткового внеску споживача у відповідальність за порушення синусоїдності кривої напруги,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 98-101, 2014.

[42] О. Г. Гриб та ін., *Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії*. Харків, Україна: ПП «Ранок-НТ», 2012.

[43] S. Liang, „A Novel Method for Major Harmonic Sources Identification in High Voltage Transmission Systems,” Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Arlington, USA, 2009.

[44] A. Ujile „Harmonic Estimation and Source Identification in Power Distribution Systems Using Observers,” A Thesis Submitted to the University of Manchester for the Degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, England, 2015.

[45] G. Heydt, „Identification of harmonic sources by a state estimation technique,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 569–576, 1989.

[46] S. S. Matair and N. R. Watson, „Harmonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network,” in *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, London, 2000, pp. 4–7.

[47] C. Madtharad, S. Premrudeepreechacharn, N. R. Watson, and R. Saengudom, „An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1514–1521, 2005.

[48] M. Moghadasian, H. Mokhtari, and A. Baladi, „Power System Harmonic State Estimation using WLS and SVD; A practical Approach,” *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, USA, 2010, pp. 730–736.

[49] C. Rakpenthai and S. Uatrongjit, „On Harmonic State Estimation of Power System With Uncertain Network Parameters,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4829–4838, 2013.

[50] J. E. Farach, W. M. Grady, and A. Arapostathis, „An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power

systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1303–1310, 1993.

[51] A. Kumar, B. Das, and J. Sharma, „Determination of location of multiple harmonic sources in a power system,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 73–78, 2004.

[52] H. Liao, „Power system harmonic state estimation via sparsity maximization,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006.

[53] H. Liao, „Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 15–23, 2007.

[54] H. Beides and G. Heydt, „Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1663–1670, 1991.

[55] M. Farhoodnea, A. Mohamed, and H. Shareef, „A new method for determining multiple harmonic source locations in a power distribution system,” in *IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 146–150, 2010.

[56] E. Gursoy, „Independent component analysis for harmonic source identification in electric power systems,” Ph.D. dissertation, Drexel University, Philadelphia, USA, 2007.

[57] H. E. Mazin, W. Xu, and B. Huang, „Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–9.

[58] H. E. Mazin, W. Xu and B. Huang, „Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, 1187-1195, 2011.

[59] Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, и С. В. Страхов, *Основы теории цепей*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1989.

[60] Г. А. Штамбергер, *Измерения в цепях переменного тока (методы уравновешивания)*. Новосибирск, Россия: Наука, 1975.

[61] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, USA: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007.

[62] F. Z. Peng and J.-S. Lai, „Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems,” *IEEE Trans. Inst. Meas*, vol. 45, no. 1, pp. 293–297. 1996.

[63] Н. А. Мельников, *Реактивная мощность в электрических сетях*. Москва, Россия: Энергия, 1975.

[64] М. Й. Бурбело, та С. М. Мельничук, „Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю,” *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 66–70, 2013.

[65] А. К. Шидловский, та В. Г. Кузнецов, *Повышение качества энергии в электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 1985.

[66] М. Й. Бурбело, *Квазізрівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.

[67] Н. С. Маркушевич, и Л. А. Солдаткина, *Качество напряжения в городских электрических сетях*. Москва, Россия: Энергия, 1975.

[68] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та М. В. Никитенко, „Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень,” *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 54–56, 2011.

[69] М. Й. Бурбело, та С. М. Мельничук, „Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю,” *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 71–75, 2015.

[70] A. Firlit, „Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms», Annex 3. «Handbook of Power Quality,” *Edited by Angelo Baggingi. John Wiley & Sons, Ltd.* pp. 27-51, 2008.

[71] М. Й. Бурбело, та А. В. Гадай, „Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж,” *Комп’ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 24/25, с. 61–67, 2016.

[72] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, С. М. Мельничук, та Ю. В. Лобода, „Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 51–56, 2017.

[73] M. J. Burbelo, V. Zavadskiy, A. Koczorowska-Gazda, L. M. Melnychuk, and Yu. V. Loboda, „Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral,” *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 100311X, 2016. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860>. doi:10.1117/12.2248788, 2016.

[74] А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э. П. Трейманис, и Я. К. Шинка, *Мощность переменного тока*. Рига, Латвия: Физ.-энерг. инст. Латв. АН, 1993.

[75] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, „Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж,” *Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та устаткування*, № 1, с. 42-49, 2019.

[76] А. И. Важнов, *Переходные процессы в машинах переменного тока*. Ленинград, СССР: Энергия, 1980.

[77] P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi, „Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals,” *Electrical Power Quality and Utilization*, vol. XIII, no 1, pp. 9–15, 2007.

[78] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, „Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,” *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. *Енергетика: надійність та енергоефективність*, № 14(1339), с. 78–82, 2019.

[79] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та О. В. Степура, „Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення нелінійних та несиметричних споживачів,” на *Science, Research, Development #18 (Наука, Исследования, Развитие #18)*, Ваку/Баку, 2019, с. 13–17.

[80] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, „Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 1, с. 24–30, 2019.

[81] И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, и Н. А. Нойбергер *Электромагнитная совместимость потребителей*. Москва, Россия: Машиностроение, 2012.

[82] А. К. Шидловский, та А. Ф. Жаркин, *Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 2005.

[83] А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, та Д. О. Малахатка, „Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів,” *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 69–77, 2018.

[84] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Умовні потужності нульової послідовності за несиметричних несинусоїдних режимів трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Вип. 38. С. 144–151. 2019.

[85] М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук, та О. В. Степура, „Аналіз чутливості методів виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,” на *Monografia pokonferencyjna. Science, Research, Development #16. Technics and technology*, Barcelona, 2019, pp. 58–67.

[86] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, „Аналіз чутливості виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних

потужностей,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 3, с.13–20, 2019.

[87] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, О. В. Саприка, та В. О. Саприка, „Моніторинг показників якості електричної енергії на підприємствах житлово-комунального господарства,” *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*, вип. 101, с. 25–27, 2010.

[88] О. Г. Гриб, Р. В. Жданов, Д. А. Гапон, и А. А. Зуев, „Современное аппаратное обеспечение устройств учета и мониторинга показателей качества электрической энергии,” *Праці ТДАТУ*, вип. 13, т. 4, с. 90–95, 2013.

[89] О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, Д. В. Бородин, и А. В. Дяченко, „Мониторинг качества электрической энергии на вводе тяговой подстанции,” *Електротехніка і Електромеханіка.*, № 6, с. 61–65, 2015.

[90] Ю. О. Варецький, та Т. І. Наконечний, „Спосіб моніторингу вищих гармонік в розподільчій електричній мережі,” МПК (2006) G 01 R 23/16, №35180, Бюл. № 17, Вер. 09, 2008.

[91] Є. Т. Володарський, та А. В. Волошко, „Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання,” *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, № 3/8(69), с. 10–17, 2014.

[92] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, та М. В. Никитенко, „Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 30–33, 2009.

[93] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та О. В. Степура, „Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів,” *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 3(271), с. 220–225, 2019.

[94] М. Й. Бурбело, та В. І. Романовський, „Вимірювальний канал для установок динамічної компенсації реактивної потужності,” *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*, № 3, 2014. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3754/5487>.

[95] О. В. Степура, „Приймальний контроль за кількісною ознакою з використанням економічного критерію оптимальності,” *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. № 2, с. 154–156, 1998.

[96] Г. Д. Карташов, и Л. П. Краснопольская, „Оценка качества по нескольким количественным признакам,” *Стандарты и качество. - Ежемесячное приложение "Надежность и контроль качества"*, № 3, с. 35–40, 1976.

[97] А. М. Бендерский, Л. В. Баумгартем, и Н. Г. Миронова, „Корректируемые планы статистического приемочного контроля по количественному признаку,” *Стандарты и качество. - Ежемесячное приложение "Надежность и контроль качества"*, № 2, с. 34–39, 1977.

[98] О. И. Тескин, Т. Д. Карташов, и А. М. Марков, „Статистический приемочный контроль по количественному признаку на основе экономических показателей и фактического риска потребителей,” *Стандарты и качество. - Ежемесячное приложение "Надежность и контроль качества"*, № 5, с. 32–36, 1985.

[99] И. В. Федун, „Планирование статистического приемочного контроля качества продукции с использованием экономического критерия оптимальности,” *Стандарты и качество. - Ежемесячное приложение "Надежность и контроль качества"*, № 8, с. 30–34, 1992.

[100] И. В. Федун, „Статистическое регулирование операции тренировки пул,” *Электронная техника*, сер. 4, вып. 1, с. 81–86, 1972.

[101] D. Shaiпап, „The Nashilton standart lot plot method of acceptance sampling by variables,” *Industrialquality control*, vol. VII, no. 1. pp. 15–34, 1950.

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати впровадження дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науково-педагогічної роботи по організації навчального процесу та його науково-методичного забезпечення



О.М. Васілевський
17» 06 2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Степури Олександра Васильовича

«Виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах»

у навчальний процес

Члени комісії у складі: декана факультету електроенергетики та електромеханіки, професора Леонтєва В. О., доцента кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Терешкевича Л. Б., доцента кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Бабенка О. В., склали цей акт про це, що для вивчення дисциплін: «Основи енергозбереження», для студентів напрямку підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» впроваджено такі результати, розроблені в дисертаційній роботі Степурою О.В.:

- створено діючу лабораторну установку з автоматизованою системою контролю обліку електроенергії (АСКОЕ) з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії. Лабораторна установка дозволяє в режимі реального часу отримувати та аналізувати інформацію про електроспоживання одночасно з декількох підстанцій енергосистеми.

Впроваджені результати дисертаційної роботи значно підвищили якість навчання студентів ВНТУ.

Декан факультету ЕЕЕМ

В.О. Леонтєв

Доцент каф. ЕСЕЕМ

Л.Б. Терешкевич

Доцент каф. ЕСЕЕМ

О.В. Бабенко

Затверджую

Директор ТОВ «Промавтоматика Вінниця»

07.02.2019 _____ М.Д. Ганчук

АКТ

**впровадження кандидатської дисертаційної роботи
Степури Олександра Васильовича**

Комісія у складі Кравця О.М. – технічного директора, Андрощука С.В. – директора з виробництва, Хващевського Ю.М. – директора департаменту електротехнічних послуг склали цей акт про наступне:

3 грудня 2018 року, згідно пропозиції здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук кафедри «Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту» Вінницького національного технічного університету Степури Олександра Васильовича було розроблено програмно-апаратний комплекс автоматизованої системи контролю обліку електроенергії (АСКОЕ) з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії.

За період дослідного випробування з 10 грудня 2018 року по 1 лютого 2019 року запропонований програмно-апаратний комплекс АСКОЕ показав високу ефективність, зокрема: підвищилася чутливість виявлення споживачів, що спотворюють якість електроенергії та з'явилася можливість розрізнити споживачів з складом гармонік, що кратні трьом.

На підставі дослідного випробування комісія рекомендує впровадити даний програмно-апаратний комплекс в промислову реалізацію АСКОЕ.

Технічний директор _____



О.М. Кравець

Директор з виробництва _____



С.В. Андрощук

Директор департаменту _____



електротехнічних послуг _____

Ю.М. Хващевський

Додаток Б

Програми розрахунків в пакеті Mathcad

$$j := \sqrt{-1} \quad U_n := \sqrt{2} \cdot 220 \quad \omega := 314 \quad I_n := \sqrt{2} \cdot 200$$

ЕРС мережі в кожній з фаз:

$$I_A := I_n \cdot e^{-j \cdot 30 \cdot \text{deg}} \quad I_B := 1 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 150 \cdot \text{deg}} \quad I_C := 0.9 \cdot I_n \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}}$$

$$I_{A3} := -0.01 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 30 \cdot \text{deg}} \quad I_{B3} := -0.01 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 150 \cdot \text{deg}} \quad I_{C3} := -1 \cdot 0.01 \cdot I_n \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}}$$

$$I_{A5} := 0.05 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 30 \cdot \text{deg}} \quad I_{B5} := 0.05 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 150 \cdot \text{deg}} \quad I_{C5} := 1 \cdot 0.05 \cdot I_n \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}}$$

$$I_{A7} := -0.04 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 30 \cdot \text{deg}} \quad I_{B7} := -0.04 \cdot I_n \cdot e^{-j \cdot 150 \cdot \text{deg}} \quad I_{C7} := -1 \cdot 0.04 \cdot I_n \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}}$$

$$Z_{t1} := (5.9 + j \cdot 17) \cdot 10^{-3} \quad Z_{t3} := (5.9 + j \cdot 3 \cdot 17) \cdot 10^{-3}$$

$$Z_{t5} := (5.9 + j \cdot 5 \cdot 17) \cdot 10^{-3} \quad Z_{t7} := (5.9 + j \cdot 7 \cdot 17) \cdot 10^{-3}$$

$$k1 := 1 \quad k := 1$$

$$\underline{K1} := k1 + 1 \quad \underline{K} := k + 1$$

$$U_A := U_n - \underline{K1} Z_{t1} \cdot I_A \quad U_{A3} := -\underline{K} Z_{t3} \cdot I_{A3} \quad U_{A5} := -\underline{K} Z_{t5} \cdot I_{A5} \quad U_{A7} := -\underline{K} Z_{t7} \cdot I_{A7}$$

$$U_A = 303.428 - 6.659i \quad U_{A3} = 0.173 + 0.233i \quad U_{A5} = -1.347 - 1.999i \quad U_{A7} = 1.462 + 2.265i$$

$$U_B := U_n \cdot e^{-j \cdot 120 \cdot \text{deg}} - \underline{K1} Z_{t1} \cdot I_B \quad U_{B3} := -\underline{K} Z_{t3} \cdot I_{B3} \quad U_{B5} := -\underline{K} Z_{t5} \cdot I_{B5} \quad U_{B7} := -\underline{K} Z_{t7} \cdot I_{B7}$$

$$U_B = -157.481 - 259.447i \quad U_{B3} = 0.115 - 0.267i \quad U_{B5} = -1.058 + 2.166i \quad U_{B7} = 1.231 - 2.399i$$

$$U_C := U_n \cdot e^{j \cdot 120 \cdot \text{deg}} - \underline{K1} Z_{t1} \cdot I_C \quad U_{C3} := -\underline{K} Z_{t3} \cdot I_{C3} \quad U_{C5} := -\underline{K} Z_{t5} \cdot I_{C5} \quad U_{C7} := -\underline{K} Z_{t7} \cdot I_{C7}$$

$$U_C = -146.909 + 266.44i \quad U_{C3} = -0.288 + 0.033i \quad U_{C5} = 2.404 - 0.167i \quad U_{C7} = -2.693 + 0.134i$$

$$\underline{I}_{A_{\text{в}}} := I_A \cdot \left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5} + j \cdot 0.5 \right) \cdot (-k1 \cdot Z_{t1}) + I_A \quad \underline{I}_{A_{\text{з}}} := I_{A3} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 3} + j \cdot 0.5 \cdot 3 \right) \cdot (-k \cdot Z_{t3}) \right] + I_{A3}$$

$$I_A = 241.615 - 144.305i \quad I_{A3} = -2.541 + 1.534i$$

$$\underline{I}_{B_{\text{в}}} := I_B \cdot \left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5} + j \cdot 0.5 \right) \cdot (-k1 \cdot Z_{t1}) + I_B \quad \underline{I}_{B_{\text{з}}} := I_{B3} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 3} + j \cdot 0.5 \cdot 3 \right) \cdot (-k \cdot Z_{t3}) \right] + I_{B3}$$

$$I_B = -245.779 - 137.092i \quad I_{B3} = 2.599 + 1.433i$$

$$\underline{I}_{C_{\text{в}}} := I_C \cdot \left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5} + j \cdot 0.5 \right) \cdot (-k1 \cdot Z_{t1}) + I_C \quad \underline{I}_{C_{\text{з}}} := I_{C3} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 3} + j \cdot 0.5 \cdot 3 \right) \cdot (-k \cdot Z_{t3}) \right] + I_{C3}$$

$$I_C = 3.748 + 253.258i \quad I_{C3} = -0.058 - 2.968i$$

$$\begin{aligned} \underline{I_{A5}} &:= I_{A5} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 5} + j \cdot 0.5 \cdot 5 \right) \cdot (-k \cdot Zt5) \right] + I_{A5} & \underline{I_{A7}} &:= I_{A7} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 7} + j \cdot 0.5 \cdot 7 \right) \cdot (-k \cdot Zt7) \right] + I_{A7} \\ I_{A5} &= 14.306 - 8.637i & I_{A7} &= -13.408 + 8.094i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I_{B5}} &:= I_{B5} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 5} + j \cdot 0.5 \cdot 5 \right) \cdot (-k \cdot Zt5) \right] + I_{B5} & \underline{I_{B7}} &:= I_{B7} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 7} + j \cdot 0.5 \cdot 7 \right) \cdot (-k \cdot Zt7) \right] + I_{B7} \\ I_{B5} &= -14.633 - 8.071i & I_{B7} &= 13.714 + 7.565i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I_{C5}} &:= I_{C5} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 5} + j \cdot 0.5 \cdot 5 \right) \cdot (-k \cdot Zt5) \right] + I_{C5} & \underline{I_{C7}} &:= I_{C7} \cdot \left[\left(\frac{1}{0.866 + j \cdot 0.5 \cdot 7} + j \cdot 0.5 \cdot 7 \right) \cdot (-k \cdot Zt7) \right] + I_{C7} \\ I_{C5} &= 0.328 + 16.708i & I_{C7} &= -0.305 - 15.659i \end{aligned}$$

$$i := 0, 1, \dots, 6000$$

$$u_{A1_i} := (|U_A| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_A)))$$

$$i_{A1_i} := (|I_A| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_A)))$$

$$u_{B1_i} := (|U_B| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_A) - 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{B1_i} := (|I_B| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_A) - 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{C1_i} := (|U_C| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_A) + 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{C1_i} := (|I_C| \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_A) + 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{A3_i} := (|U_{A3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3})))$$

$$i_{A3_i} := (|I_{A3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3})))$$

$$u_{B3_i} := (|U_{B3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3}) - 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{B3_i} := (|I_{B3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3}) - 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{C3_i} := (|U_{C3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3}) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{C3_i} := (|I_{C3}| \cdot \sin(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3}) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{A5_i} := (|U_{A5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5})))$$

$$i_{A5_i} := (|I_{A5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5})))$$

$$u_{B5_i} := (|U_{B5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5}) - 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{B5_i} := (|I_{B5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5}) - 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{C5_i} := (|U_{C5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5}) + 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{C5_i} := (|I_{C5}| \cdot \sin(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5}) + 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{A7_i} := (|U_{A7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7})))$$

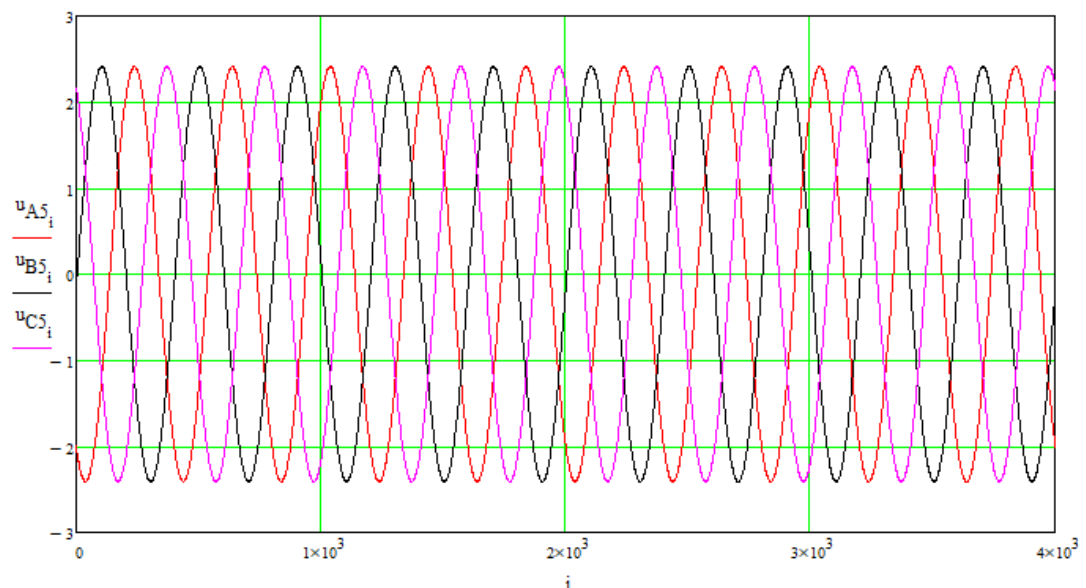
$$i_{A7_i} := (|I_{A7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7})))$$

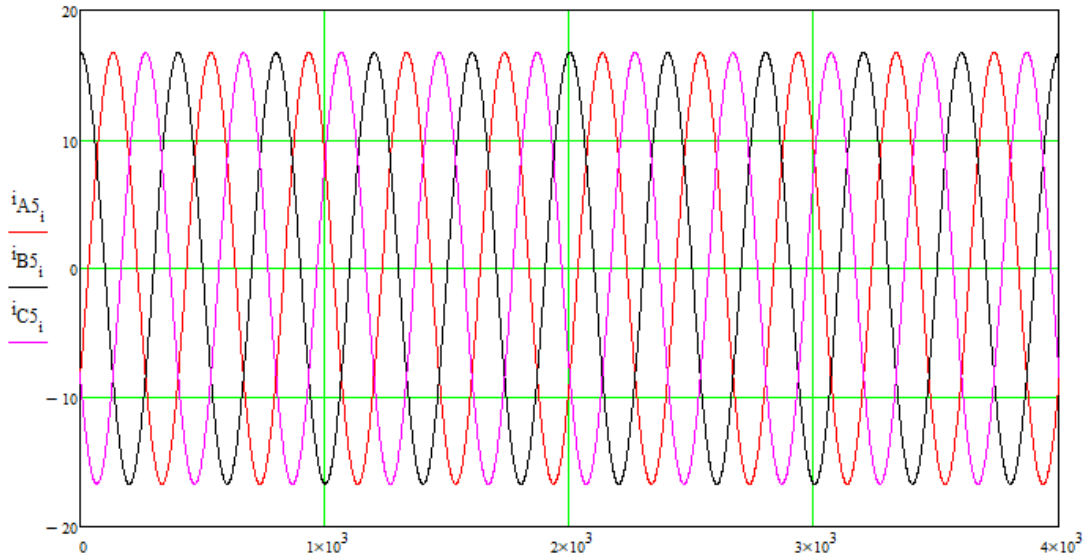
$$u_{B7_i} := (|U_{B7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7}) - 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{B7_i} := (|I_{B7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7}) - 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$u_{C7_i} := (|U_{C7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7}) + 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$

$$i_{C7_i} := (|I_{C7}| \cdot \sin(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7}) + 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))$$





$$\begin{aligned}
 u_{a1_i} &:= (-|U_{A1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A1}))) & i_{a1_i} &:= (-|I_{A1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A1}))) \\
 u_{b1_i} &:= (-|U_{B1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A1}) - 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{b1_i} &:= (-|I_{B1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A1}) - 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 u_{c1_i} &:= (-|U_{C1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A1}) + 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{c1_i} &:= (-|I_{C1}| \cdot \cos(0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A1}) + 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 \\
 u_{a3_i} &:= (-|U_{A3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3}))) & i_{a3_i} &:= (-|I_{A3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3}))) \\
 u_{b3_i} &:= (-|U_{B3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3}) - 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{b3_i} &:= (-|I_{B3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3}) - 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 u_{c3_i} &:= (-|U_{C3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A3}) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{c3_i} &:= (-|I_{C3}| \cdot \cos(3 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A3}) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 \\
 u_{a5_i} &:= (-|U_{A5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5}))) & i_{a5_i} &:= (-|I_{A5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5}))) \\
 u_{b5_i} &:= (-|U_{B5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5}) - 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{b5_i} &:= (-|I_{B5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5}) - 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 u_{c5_i} &:= (-|U_{C5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A5}) + 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{c5_i} &:= (-|I_{C5}| \cdot \cos(5 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A5}) + 5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 \\
 u_{a7_i} &:= (-|U_{A7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7}))) & i_{a7_i} &:= (-|I_{A7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7}))) \\
 u_{b7_i} &:= (-|U_{B7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7}) - 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{b7_i} &:= (-|I_{B7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7}) - 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 u_{c7_i} &:= (-|U_{C7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(U_{A7}) + 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3})) & i_{c7_i} &:= (-|I_{C7}| \cdot \cos(7 \cdot 0.00001 \cdot \omega \cdot i + \arg(I_{A7}) + 7 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}))
 \end{aligned}$$

$$u_{A_i} = u_{A1_i} + u_{A3_i} + u_{A5_i} + u_{A7_i}$$

$$i_{A_i} = i_{A1_i} + i_{A3_i} + i_{A5_i} + i_{A7_i}$$

$$u_{B_i} = u_{B1_i} + u_{B3_i} + u_{B5_i} + u_{B7_i}$$

$$i_{B_i} = i_{B1_i} + i_{B3_i} + i_{B5_i} + i_{B7_i}$$

$$u_{C_i} = u_{C1_i} + u_{C3_i} + u_{C5_i} + u_{C7_i}$$

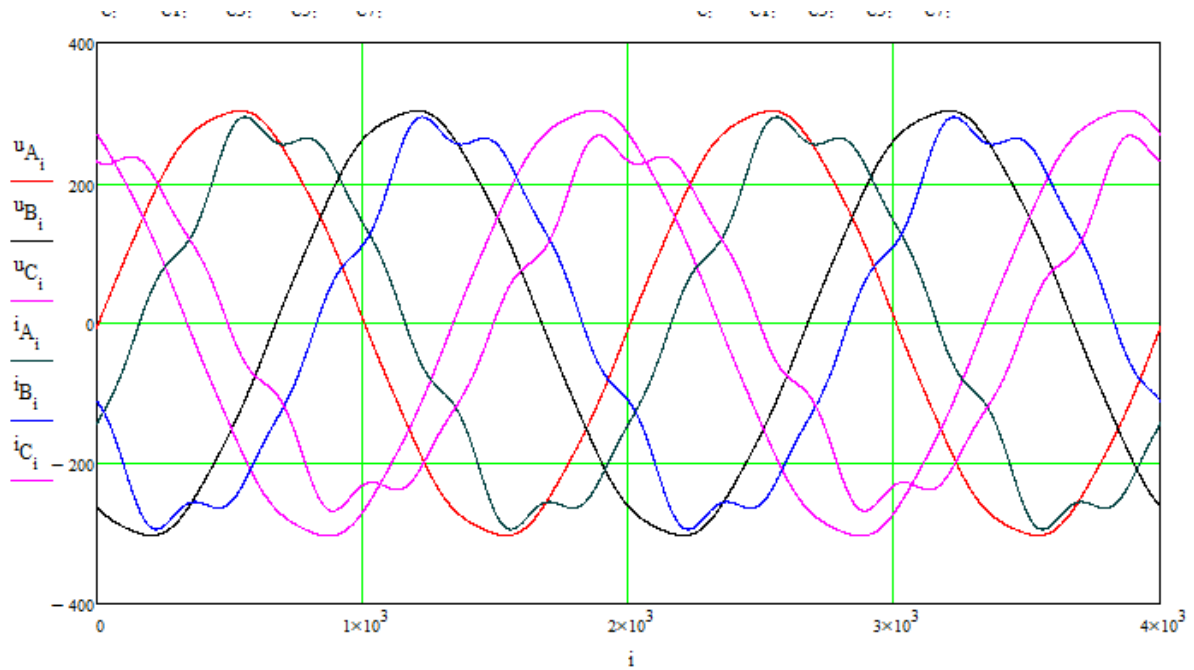
$$i_{C_i} = i_{C1_i} + i_{C3_i} + i_{C5_i} + i_{C7_i}$$

$$u_{a_i} = u_{a1_i} + u_{a3_i} + u_{a5_i} + u_{a7_i}$$

$$i_{a_i} = i_{a1_i} + i_{a3_i} + i_{a5_i} + i_{a7_i}$$

$$u_{b_i} = u_{b1_i} + u_{b3_i} + u_{b5_i} + u_{b7_i}$$

$$i_{b_i} = i_{b1_i} + i_{b3_i} + i_{b5_i} + i_{b7_i}$$



$$u_{00_i} := \frac{1}{3} \cdot (u_{A_i} + u_{B_i} + u_{C_i}) \quad i_{00_i} := \frac{1}{3} \cdot (i_{A_i} + i_{B_i} + i_{C_i})$$

$i := 0, 1.. 4000$

$$u_{p_i} := \frac{1}{3} \cdot (u_{A_i} - u_{00_i} + u_{B_{i+667}} - u_{00_{i+667}} + u_{C_{i+1333}} - u_{00_{i+1333}})$$

$$i_{p_i} := \frac{1}{3} \cdot (i_{A_i} - i_{00_i} + i_{B_{i+667}} - i_{00_{i+667}} + i_{C_{i+1333}} - i_{00_{i+1333}})$$

$$u_{n_i} := \frac{1}{3} \cdot (u_{A_{i+2000}} - u_{00_{i+2000}} + u_{B_{i+1333}} - u_{00_{i+1333}} + u_{C_{i+667}} - u_{00_{i+667}})$$

$$i_{n_i} := \frac{1}{3} \cdot (i_{A_{i+2000}} - i_{00_{i+2000}} + i_{B_{i+1333}} - i_{00_{i+1333}} + i_{C_{i+667}} - i_{00_{i+667}})$$

$$u_{rA_i} := \frac{1}{3} \cdot (u_{A_i} - u_{00_i} + u_{A_{i+667}} - u_{00_{i+667}} + u_{A_{i+1333}} - u_{00_{i+1333}})$$

$$i_{rA_i} := \frac{1}{3} \cdot (i_{A_i} - i_{00_i} + i_{A_{i+667}} - i_{00_{i+667}} + i_{A_{i+1333}} - i_{00_{i+1333}})$$

$$u_{11_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot u_{A_i} - u_{B_i} - u_{C_i}) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (u_{B_{i+500}} - u_{C_{i+500}}) \right]$$

$$u_{22_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot u_{A_i} - u_{B_i} - u_{C_i}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (u_{B_{i+500}} - u_{C_{i+500}}) \right]$$

$$i_{11_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot i_{A_i} - i_{B_i} - i_{C_i}) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (i_{B_{i+500}} - i_{C_{i+500}}) \right]$$

$$i_{22_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot i_{A_i} - i_{B_i} - i_{C_i}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (i_{B_{i+500}} - i_{C_{i+500}}) \right]$$

$$p_{2i_i} := 3 \cdot [(u_{11_i}) \cdot i_{22_i}] \quad p_{2u_i} := 3 \cdot [(i_{11_i}) \cdot u_{22_i}]$$

$$u_{0_i} := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (u_{A_i} + u_{B_i} + u_{C_i}) \quad i_{0_i} := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_{A_i} + i_{B_i} + i_{C_i})$$

$$u_{\alpha_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot u_{A_i} - u_{B_i} - u_{C_i}) \quad u_{\beta_i} := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (u_{B_i} - u_{C_i}) \quad u_{\alpha\beta_i} := \sqrt{(u_{\alpha_i})^2 + (u_{\beta_i})^2}$$

$$u_{\gamma_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot u_{A_i} - u_{B_i} - u_{C_i}) \quad u_{\delta_i} := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (u_{B_i} - u_{C_i})$$

$$u_{1_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (u_{\alpha_i} - u_{\delta_i}) \quad u_{2_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (u_{\alpha_i} + u_{\delta_i})$$

$$i_{\alpha_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot i_{A_i} - i_{B_i} - i_{C_i}) \quad i_{\beta_i} := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (i_{B_i} - i_{C_i}) \quad u_{\alpha\beta 0_i} := \sqrt{(u_{\alpha_i})^2 + (u_{\beta_i})^2 + (u_{0_i})^2}$$

$$i_{\gamma_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (2 \cdot i_{A_i} - i_{B_i} - i_{C_i}) \quad i_{\delta_i} := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (i_{B_i} - i_{C_i})$$

$$i_{1_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (i_{\alpha_i} - i_{\delta_i}) \quad i_{2_i} := \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (i_{\alpha_i} + i_{\delta_i})$$

$$S_{\alpha\beta} := \sqrt{[(u_{\alpha_i})^2 + (u_{\beta_i})^2] \cdot [(i_{\alpha_i})^2 + (i_{\beta_i})^2]} \quad C_{0_i} := u_{\alpha_i} \cdot i_{\alpha_i} + u_{\beta_i} \cdot i_{\beta_i} \quad C_{0_i} := u_{\alpha_i} \cdot i_{\alpha_i} + u_{\beta_i} \cdot i_{\beta_i} + u_{0_i} \cdot i_{0_i}$$

$$B\beta_i := \sqrt{2} \cdot (u_{\alpha_i} \cdot i_{0_i} - u_{0_i} \cdot i_{\alpha_i}) \quad B\alpha_i := \sqrt{2} \cdot (u_{0_i} \cdot i_{\beta_i} - u_{\beta_i} \cdot i_{0_i}) \quad B\alpha\beta_i := \sqrt{(B\alpha_i)^2 + (B\beta_i)^2}$$

$$P_{00_i} := 3 \cdot [(u_{1_i} + u_{2_i}) \cdot i_{00_i} - (i_{1_i} + i_{2_i}) \cdot u_{00_i}]$$

$$B\beta_{1_i} := \sqrt{2} \cdot (u_{\alpha_i} \cdot i_{0_i}) \quad B\beta_{2_i} := \sqrt{2} \cdot (-u_{0_i} \cdot i_{\alpha_i}) \quad B\alpha_{1_i} := \sqrt{2} \cdot (-u_{\beta_i} \cdot i_{0_i}) \quad B\alpha_{2_i} := \sqrt{2} \cdot (u_{0_i} \cdot i_{\beta_i})$$

$$P_{10_i} := 3 \cdot [(u_{1_i} + u_{2_i}) \cdot i_{00_i}] \quad P_{01_i} := 3 \cdot [(i_{1_i} + i_{2_i}) \cdot u_{00_i}] \quad P_{12_i} := 3 \cdot [(u_{1_i}) \cdot i_{2_i}] \quad P_{21_i} := 3 \cdot [(i_{1_i}) \cdot u_{2_i}]$$

$$C_{\alpha\beta} := (u_{A_i} \cdot i_{A_i} + u_{B_i} \cdot i_{B_i} + u_{C_i} \cdot i_{C_i}) \quad B_{0_i} := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [(u_{A_i} - u_{B_i}) \cdot i_{C_i} + (u_{B_i} - u_{C_i}) \cdot i_{A_i} + (u_{C_i} - u_{A_i}) \cdot i_{B_i}]$$

$$B_{2_i} := (u_{a_i} \cdot i_{A_i} + u_{b_i} \cdot i_{B_i} + u_{c_i} \cdot i_{C_i}) \quad B_{3_i} := (u_{A_i} \cdot i_{a_i} + u_{B_i} \cdot i_{b_i} + u_{C_i} \cdot i_{c_i}) \quad B_{4_i} := (u_{\beta_i} \cdot i_{\alpha_i} - u_{\alpha_i} \cdot i_{\beta_i})$$

$$S_{1_i} := \sqrt{[(u_{A_i})^2 + (u_{B_i})^2 + (u_{C_i})^2] \cdot [(i_{A_i})^2 + (i_{B_i})^2 + (i_{C_i})^2]} \quad U_{1_i} := \sqrt{(u_{A_i})^2 + (u_{B_i})^2 + (u_{C_i})^2}$$

$$B_i := \sqrt{(u_{A_i} \cdot i_{B_i} - u_{B_i} \cdot i_{A_i})^2 + (u_{B_i} \cdot i_{C_i} - u_{C_i} \cdot i_{B_i})^2 + (u_{C_i} \cdot i_{A_i} - u_{A_i} \cdot i_{C_i})^2} \quad I_{\alpha\beta} := \sqrt{(i_{A_i})^2 + (i_{B_i})^2 + (i_{C_i})^2}$$

$$S_i := \sqrt{(C_i)^2 + (B_{2_i})^2}$$

$$C1_i := (u_{A1_i} \cdot i_{A1_i} + u_{B1_i} \cdot i_{B1_i} + u_{C1_i} \cdot i_{C1_i})$$

$$B01_i := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[(u_{A1_i} - u_{B1_i}) \cdot i_{C1_i} + (u_{B1_i} - u_{C1_i}) \cdot i_{A1_i} + (u_{C1_i} - u_{A1_i}) \cdot i_{B1_i} \right]$$

$$B21_i := (u_{a1_i} \cdot i_{A1_i} + u_{b1_i} \cdot i_{B1_i} + u_{c1_i} \cdot i_{C1_i})$$

$$p_{\alpha_i} := u_{\alpha_i} \cdot i_{\alpha_i} \quad q_{\alpha_i} := u_{\gamma_i} \cdot i_{\alpha_i}$$

$$p_{\beta_i} := u_{\delta_i} \cdot i_{\delta_i} \quad q_{\beta_i} := u_{\beta_i} \cdot i_{\delta_i}$$

$$P2p_i := \frac{p_{\alpha_i} - p_{\beta_i}}{1} \quad Q2p_i := \frac{q_{\alpha_i} + q_{\beta_i}}{1}$$

$$pq_{\alpha_i} := u_{\alpha_i} \cdot i_{\delta_i} \quad qq_{\alpha_i} := u_{\gamma_i} \cdot i_{\delta_i}$$

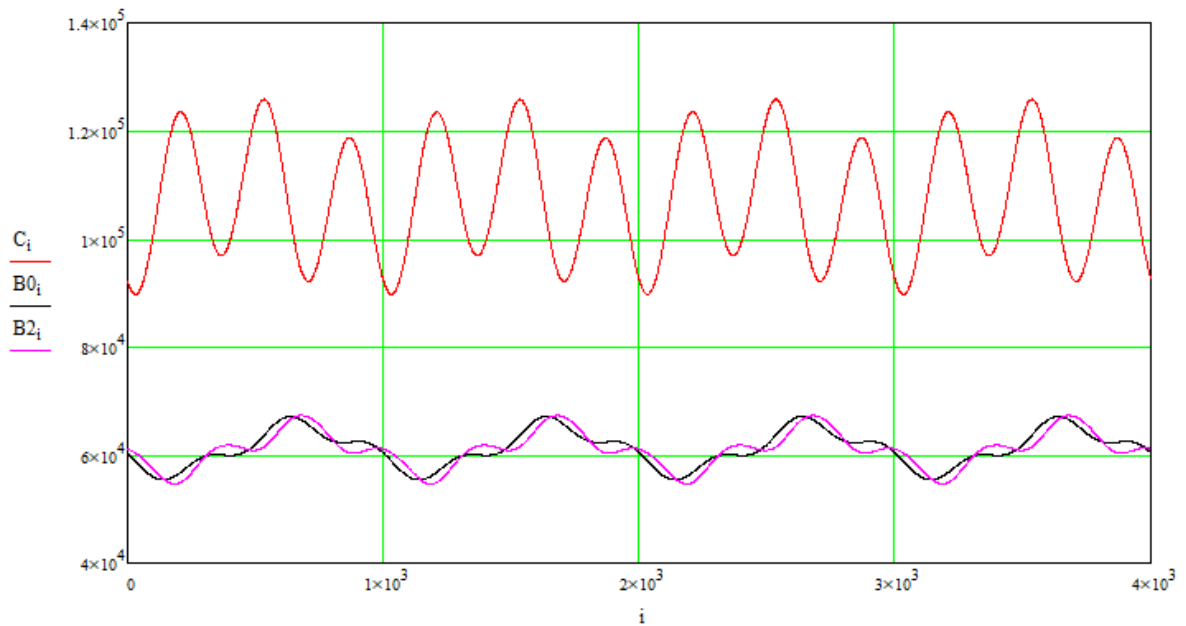
$$pq_{\beta_i} := u_{\delta_i} \cdot i_{\alpha_i} \quad qq_{\beta_i} := u_{\beta_i} \cdot i_{\alpha_i}$$

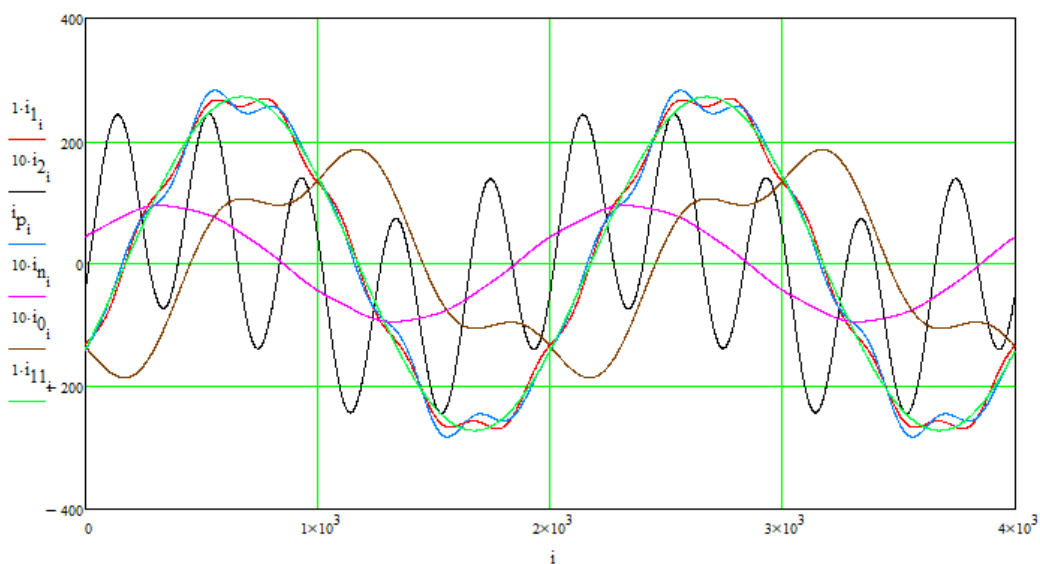
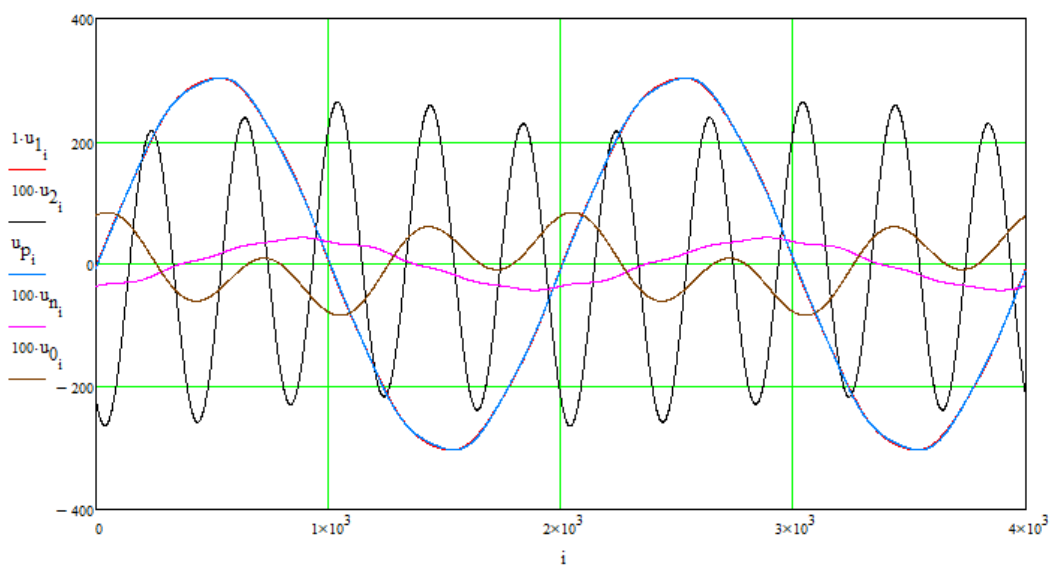
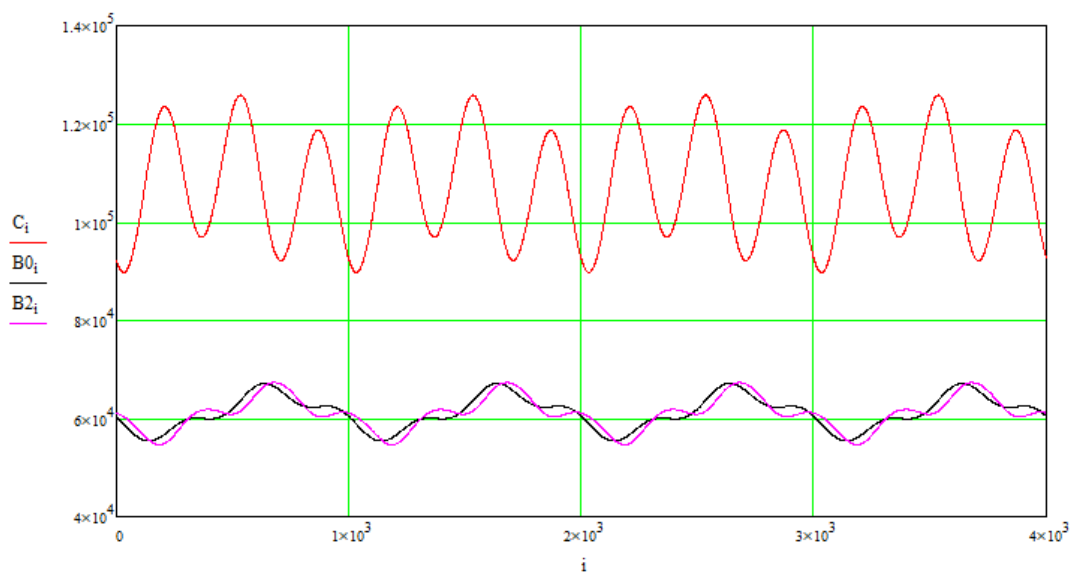
$$P2q_i := \frac{pq_{\alpha_i} - pq_{\beta_i}}{1} \quad Q2q_i := \frac{qq_{\alpha_i} + qq_{\beta_i}}{1}$$

$$P2_i := u_{A1_i} \cdot i_{A1_i} + u_{B1_i} \cdot i_{C1_i} + u_{C1_i} \cdot i_{B1_i} \quad Q2_i := u_{a1_i} \cdot i_{A1_i} + u_{b1_i} \cdot i_{C1_i} + u_{c1_i} \cdot i_{B1_i}$$

$$p12_i := 0.5 \cdot (P2p_i + P2q_i) \quad p21_i := 0.5 \cdot (P2p_i - P2q_i)$$

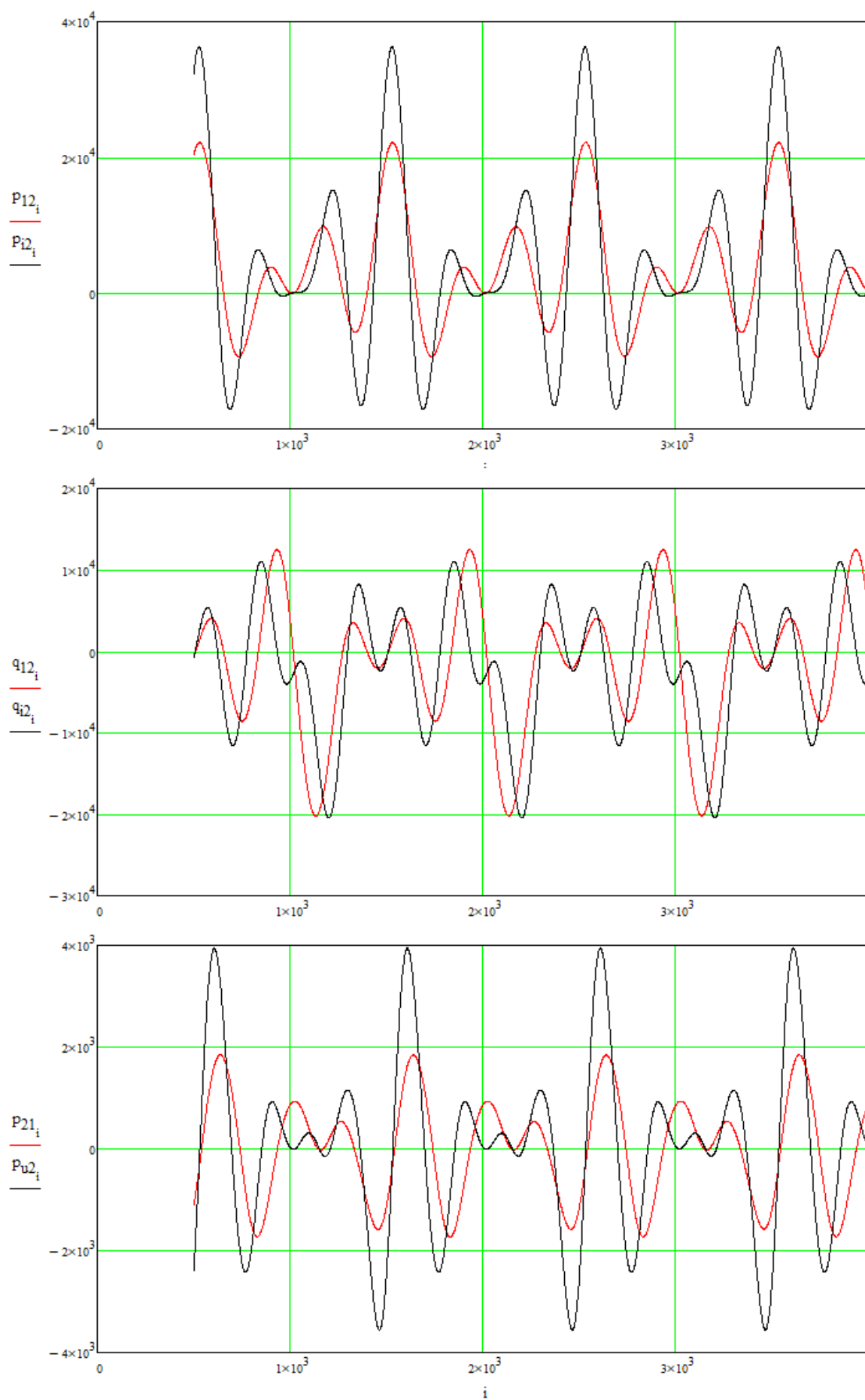
$$q12_i := 0.5 \cdot (Q2p_i + Q2q_i) \quad q21_i := 0.5 \cdot (Q2p_i - Q2q_i)$$

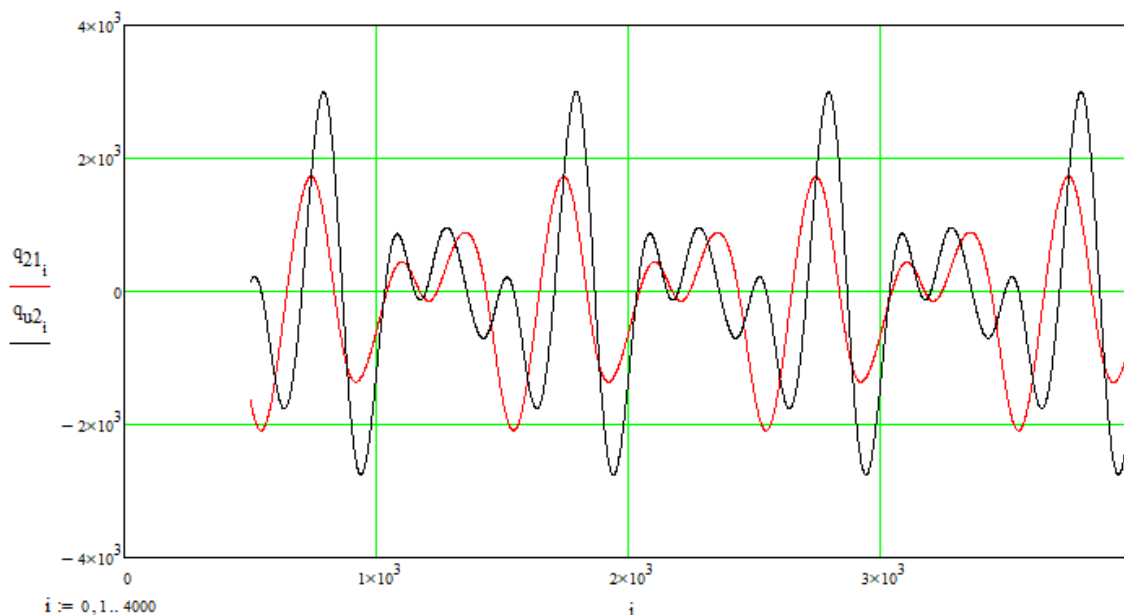




$i := 500, 501.. 4000$

$$p_{i2_i} := u_{\alpha_i} \cdot (i_{\alpha_i} + i_{\beta_{i-500}}) \quad q_{i2_i} := u_{\beta_i} \cdot (i_{\alpha_i} + i_{\beta_{i-500}}) \quad p_{u2_i} := i_{\alpha_i} \cdot (u_{\alpha_i} + u_{\beta_{i-500}}) \quad q_{u2_i} := i_{\alpha_i} \cdot (u_{\alpha_{i-500}} - u_{\beta_i})$$





Змінюється q $n := 0$ $l := 1$ (крок зміни n)
 $m := 1000$ (кількість q)

$$q1 := \begin{cases} q1_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q1_i \leftarrow q1_{i-1} + p12_i \\ q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q2_i \leftarrow q2_{i-1} + q12_i \\ q2 \end{cases}$$

Змінюється q $n := 1000$ $l := 1001$ $m := 4000$ (кількість q)

$$Q1 := \begin{cases} Q1_{11} \leftarrow q1_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q1_i \leftarrow Q1_{i-1} + p12_i - p12_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q1 \end{cases} \quad Q2 := \begin{cases} Q2_{11} \leftarrow q2_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q2_i \leftarrow Q2_{i-1} + q12_i - q12_{i-1000} \\ Q2 \cdot 0.001 \end{cases}$$

$Q1_{4000} = 3.688 \times 10^3$ $Q2_{4000} = -2.167 \times 10^3$

$$q3 := \begin{cases} q3_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q3_i \leftarrow q3_{i-1} + p21_i \\ q3 \end{cases} \quad q4 := \begin{cases} q4_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q4_i \leftarrow q4_{i-1} + q21_i \\ q4 \end{cases}$$

$$Q3 := \begin{cases} Q3_{11} \leftarrow q3_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q3_i \leftarrow Q3_{i-1} + p21_i - p21_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q3 \end{cases} \quad Q4 := \begin{cases} Q4_{11} \leftarrow q4_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q4_i \leftarrow Q4_{i-1} + q21_i - q21_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q4 \end{cases}$$

$$p12_i := p12_i - Q1_{4000}$$

$$p21_i := p21_i - Q3_{4000}$$

$$Q3_{3000} = 2.904 \times 10^{-3}$$

$$q21_i := q21_i - Q4_{4000} = 0.011$$

Змінюється q $n := 0$ $l := 1$ (крок зміни n)
 $m := 1000$ (кількість q)

$$q1 := \begin{cases} q1_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q1_i \leftarrow q1_{i-1} + C_i \\ q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q2_i \leftarrow q2_{i-1} + B2_i \\ q2 \end{cases} \quad q3 := \begin{cases} q3_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q3_i \leftarrow q3_{i-1} + B0_i \\ q3 \end{cases}$$

Змінюється q $\underline{\underline{m}} := 1000$ $\underline{\underline{1}} := 1001$ (крок зміни n) $\underline{\underline{m}} := 4000$ (кількість q)

$$\underline{\underline{Q1}} := \begin{cases} Q1_{11} \leftarrow q1_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q1_i \leftarrow Q1_{i-1} + C_i - C_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q1 \end{cases} \quad \underline{\underline{Q2}} := \begin{cases} Q2_{11} \leftarrow q2_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q2_i \leftarrow Q2_{i-1} + B2_i - B2_{i-1000} \\ Q2 \cdot 0.001 \end{cases} \quad \underline{\underline{Q3}} := \begin{cases} Q3_{11} \leftarrow q3_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q3_i \leftarrow Q3_{i-1} + (B0_i - B0_{i-1000}) \\ 0.001 \cdot Q3 \end{cases}$$

$$Q1_{3000} = 1.078 \times 10^5$$

$$Q2_{3000} = 6.108 \times 10^4$$

$$Q3_{3000} = 6.121 \times 10^4$$

$$q4 := \begin{cases} q4_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q4_i \leftarrow q4_{i-1} + (u_{A_i})^2 \\ q4 \end{cases} \quad q5 := \begin{cases} q5_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q5_i \leftarrow q5_{i-1} + (u_{B_i})^2 \\ q5 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{Q4}} := \begin{cases} Q4_{11} \leftarrow q4_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q4_i \leftarrow Q4_{i-1} + (u_{A_i})^2 - (u_{A_{i-1000}})^2 \\ 0.001 \cdot Q4 \\ \sqrt{Q4_{3000}} = 0.081 \end{cases} \quad \underline{\underline{Q5}} := \begin{cases} Q5_{11} \leftarrow q5_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q5_i \leftarrow Q5_{i-1} + (u_{B_i})^2 - (u_{B_{i-1000}})^2 \\ 0.001 \cdot Q5 \\ \sqrt{Q5_{3000}} = 0.34 \end{cases}$$

$$np_i := C_i - Q1_{4000}$$

$$nq_i := B2_i - Q2_{4000}$$

Змінюється i $n := 0$ $\underline{\underline{m}} := 4000$

$$V_{\alpha_1} := 1 \cos(0.00002 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_1} := 1 \cdot \sin(0.00002 \cdot \omega i)$$

$$q1 := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + np_i \cdot V_{\alpha_1} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + nq_i \cdot V_{\beta_1} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$a1 := q1_{4001}$$

$$b1 := q2_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -2.607 \times 10^3$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 1.38 \times 10^3$$

$$Np_2 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$Np_2 = 1.38 \times 10^3 - 2.607i \times 10^3$$

$$|Np_2| = 2.949 \quad \arg(Np_2) = -62.106 \cdot \text{deg}$$

$$q^3 := \begin{cases} q^3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^3_{i+1} \leftarrow q^3_i + nq_i \cdot V\alpha_i \\ 0.0005 \cdot q^3 \end{cases} \quad q^4 := \begin{cases} q^4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^4_{i+1} \leftarrow q^4_i + nq_i \cdot V\beta_i \\ 0.0005 \cdot q^4 \end{cases}$$

$$a2 := q^3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = -1.381 \times 10^3$$

$$b2 := q^4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = -2.613 \times 10^3$$

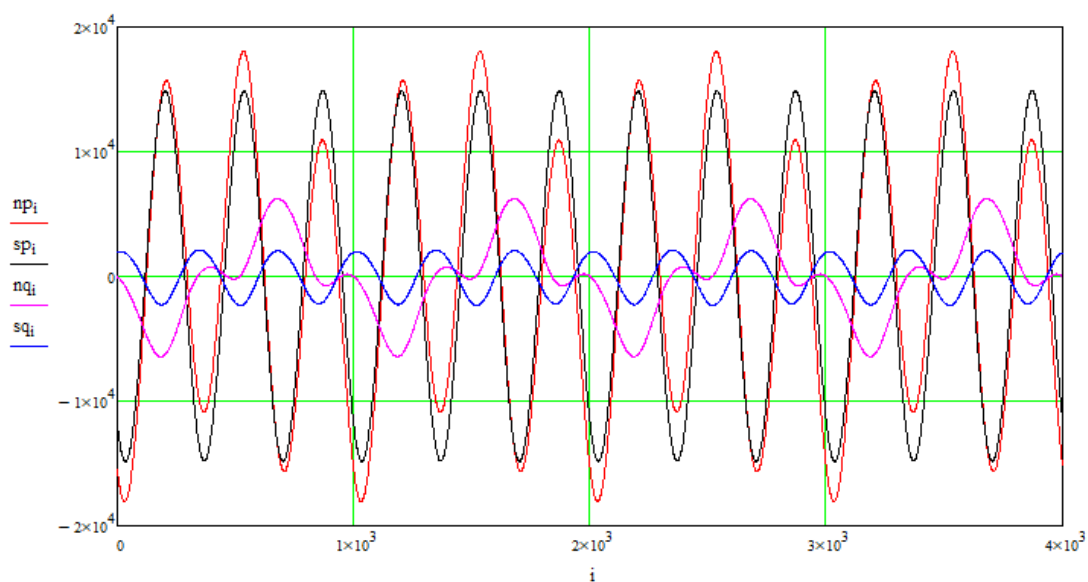
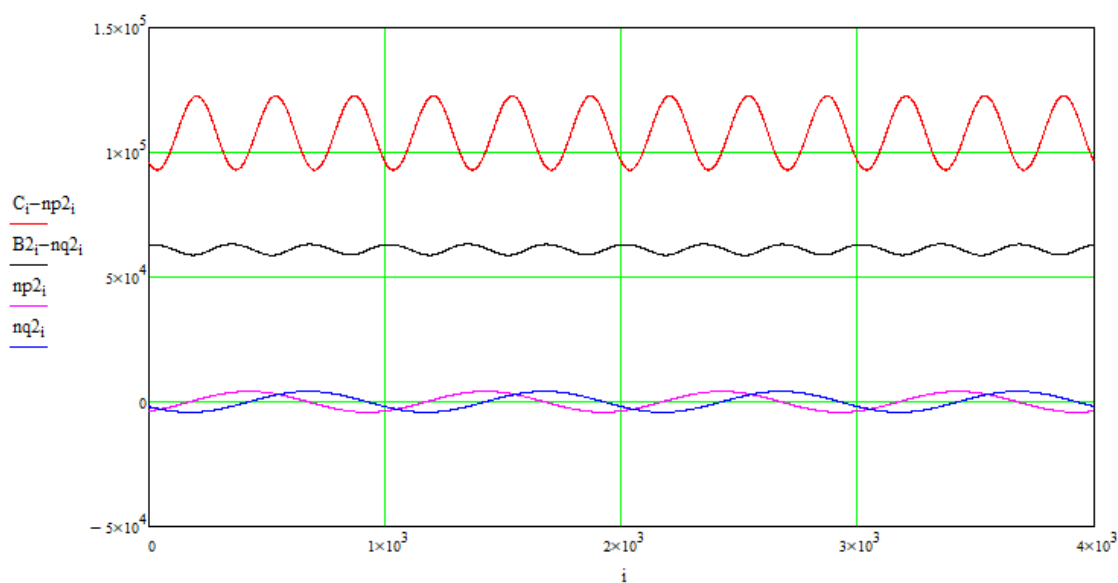
$$Nq_2 := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$Nq_2 = -2.613 \times 10^3 - 1.381i \times 10^3$$

$$|Nq_2| = 2.956 \times 10^3 \quad \arg(Nq_2) = -152.155 \cdot \text{deg}$$

$$np2_i := \sqrt{2} \cdot (|Np_2| \cdot \sin(0.00002 \cdot \omega \cdot i + \arg(Np_2))) \quad nq2_i := \sqrt{2} \cdot (|Nq_2| \cdot \sin(0.00002 \cdot \omega \cdot i + \arg(Nq_2)))$$

$$sp_i := np_i - np2_i \quad sq_i := nq_i - nq2_i$$



Змінюється q $n_1 := 1000$ $l := 1001$ (крок зміни n)
 $m := 2000$ (кількість q)

$$q1 := \begin{cases} q1_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q1_i \leftarrow q1_{i-1} + (np_i)^2 \\ q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q2_i \leftarrow q2_{i-1} + (nq_i)^2 \\ q2 \end{cases} \quad q3 := \begin{cases} q3_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q3_i \leftarrow q3_{i-1} + (sp_i)^2 \\ q3 \end{cases} \quad q4 := \begin{cases} q4_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q4_i \leftarrow q4_{i-1} + (sq_i)^2 \\ q4 \end{cases}$$

Змінюється q $n_1 := 2000$ $l := 2001$ (крок зміни n) $m := 4000$ (кількість q)

$$Q1 := \begin{cases} Q1_{11} \leftarrow q1_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q1_i \leftarrow Q1_{i-1} + (np_i)^2 - (np_{i-1000})^2 \\ 0.001 \cdot Q1 \\ \sqrt{Q1_{3000}} = 1.09 \times 10^4 \end{cases} \quad Q2 := \begin{cases} Q2_{11} \leftarrow q2_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q2_i \leftarrow Q2_{i-1} + (nq_i)^2 - (nq_{i-1000})^2 \\ Q2 \cdot 0.001 \\ \sqrt{Q2_{3000}} = 3.327 \times 10^3 \end{cases}$$

$$Q3 := \begin{cases} Q3_{11} \leftarrow q3_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q3_i \leftarrow Q3_{i-1} + (sp_i)^2 - (sp_{i-1000})^2 \\ 0.001 \cdot Q3 \\ \sqrt{Q3_{3000}} = 1.05 \times 10^4 \end{cases} \quad Q4 := \begin{cases} Q4_{11} \leftarrow q4_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q4_i \leftarrow Q4_{i-1} + (sq_i)^2 - (sq_{i-1000})^2 \\ Q4 \cdot 0.001 \\ \sqrt{Q4_{3000}} = 1.527 \times 10^3 \end{cases}$$

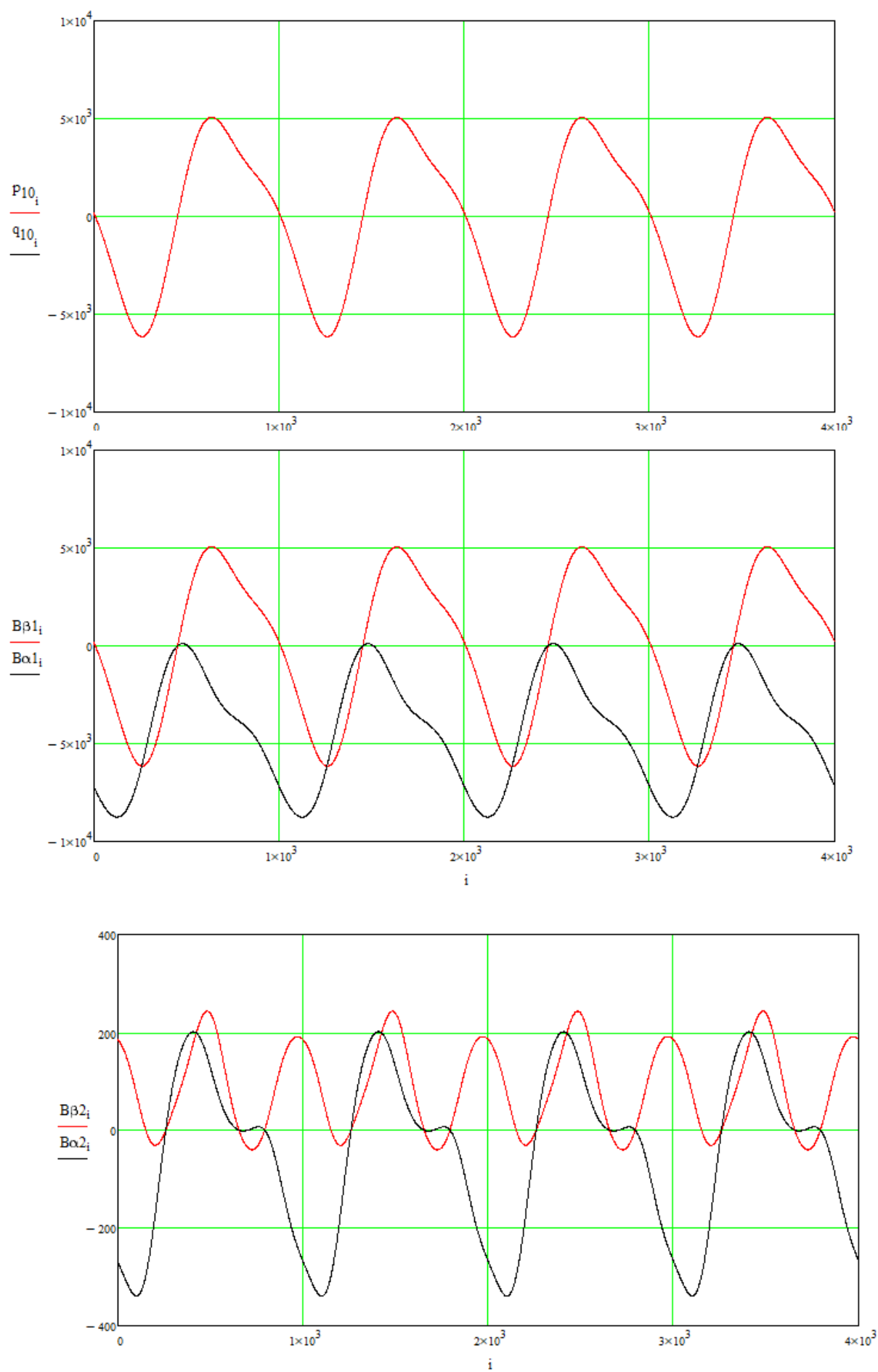
Змінюється q $n_1 := 0$ $l := 1$ (крок зміни n)
 $m := 1000$ (кількість q)

$$q1 := \begin{cases} q1_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q1_i \leftarrow q1_{i-1} + B\beta1_i \\ q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q2_i \leftarrow q2_{i-1} + B\beta2_i \\ q2 \end{cases} \quad q3 := \begin{cases} q3_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q3_i \leftarrow q3_{i-1} + B\alpha1_i \\ q3 \end{cases} \quad q4 := \begin{cases} q4_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q4_i \leftarrow q4_{i-1} + B\alpha2_i \\ q4 \end{cases}$$

Змінюється q $n_1 := 1000$ $l := 1001$ $m := 4000$ (кількість q)

$$Q1 := \begin{cases} Q1_{11} \leftarrow q1_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q1_i \leftarrow Q1_{i-1} + B\beta1_i - B\beta1_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q1 \\ Q1_{4000} = 33.529 \end{cases} \quad Q2 := \begin{cases} Q2_{11} \leftarrow q2_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q2_i \leftarrow Q2_{i-1} + B\beta2_i - B\beta2_{i-1000} \\ Q2 \cdot 0.001 \\ Q2_{4000} = 88.594 \end{cases}$$

$$Q3 := \begin{cases} Q3_{11} \leftarrow q3_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q3_i \leftarrow Q3_{i-1} + B\alpha1_i - B\alpha1_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q3 \\ Q3_{3000} = -4.274 \times 10^3 \end{cases} \quad Q4 := \begin{cases} Q4_{11} \leftarrow q4_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q4_i \leftarrow Q4_{i-1} + B\alpha2_i - B\alpha2_{i-1000} \\ 0.001 \cdot Q4 \\ Q4_{4000} = -48.385 \end{cases}$$



$$B\beta_{1_i} := B\beta_{1_i} - Q1_{4000} \quad B\alpha_{1_i} := B\alpha_{1_i} - Q3_{4000}$$

$$B\beta_{2_i} := B\beta_{2_i} - Q2_{4000} \quad B\alpha_{2_i} := B\alpha_{2_i} - Q4_{4000}$$

$$\begin{aligned} \text{Змінюється } q \quad \underline{\underline{11}} := 0 \quad \underline{\underline{1}} := 1 \quad (\text{крок зміни } n) \\ \underline{\underline{m}} := 1000 \quad (\text{кількість } q) \end{aligned}$$

$$q7 := \begin{cases} q7_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q7_i \leftarrow q7_{i-1} + (B\beta_{1_i})^2 \\ q7 \end{cases} \quad q9 := \begin{cases} q9_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q9_i \leftarrow q9_{i-1} + (B\alpha_{1_i})^2 \\ q9 \end{cases} \quad q8 := \begin{cases} q8_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q8_i \leftarrow q8_{i-1} + (B\beta_{2_i})^2 \\ q8 \end{cases} \quad q10 := \begin{cases} q10_{11} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..m \\ q10_i \leftarrow q10_{i-1} + (B\alpha_{2_i})^2 \\ q10 \end{cases}$$

$$\text{Змінюється } q \quad \underline{\underline{11}} := 1000 \quad \underline{\underline{1}} := 1001 \quad (\text{крок зміни } n) \quad \underline{\underline{m}} := 4000 \quad (\text{кількість } q)$$

$$\underline{\underline{Q7}} := \begin{cases} Q7_{11} \leftarrow q7_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q7_i \leftarrow Q7_{i-1} + (B\beta_{1_i})^2 - (B\beta_{1_{i-1000}})^2 \\ 0.001 \cdot Q7 \end{cases} \quad \underline{\underline{Q9}} := \begin{cases} Q9_{11} \leftarrow q9_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q9_i \leftarrow Q9_{i-1} + (B\alpha_{1_i})^2 - (B\alpha_{1_{i-1000}})^2 \\ 0.001 \cdot Q9 \end{cases}$$

$$\sqrt{Q7_{3000}} = 3.709 \times 10^3$$

$$\sqrt{Q9_{3000}} = 2.863 \times 10^3$$

$$Q8 := \begin{cases} Q8_{11} \leftarrow q8_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q8_i \leftarrow Q8_{i-1} + (B\beta_{2_i})^2 - (B\beta_{2_{i-1000}})^2 \\ Q8 \cdot 0.001 \end{cases} \quad \underline{\underline{Q10}} := \begin{cases} Q10_{11} \leftarrow q10_{11} \\ \text{for } i \in 1..m \\ Q10_i \leftarrow Q10_{i-1} + (B\alpha_{2_i})^2 - (B\alpha_{2_{i-1000}})^2 \\ 0.001 \cdot Q10 \end{cases}$$

$$\sqrt{Q8_{3000}} = 89.487$$

$$\sqrt{Q10_{3000}} = 167.89$$

$$\text{Змінюється } q \quad \underline{\underline{n}} := 0 \quad \underline{\underline{m}} := 4000$$

$$V_{\alpha_1} := 1 \cos(0.00005 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_1} := 1 \cdot \sin(0.00005 \cdot \omega i)$$

$$q1 := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{p_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad q2 := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{p_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{a1}} := q1_{4001}$$

$$\underline{\underline{b1}} := q2_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -6.113$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 10.087$$

$$Sp_4 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$Sp_4 = 10.087 - 6.113j$$

$$|Sp_4| = 11.795 \quad \arg(Sp_4) = -31.217 \cdot \text{deg}$$

$$q3 := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + sq_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad q4 := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + sq_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{a2}} := q3_{4001}$$

$$\underline{\underline{b2}} := q4_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = -0.7$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = 0.011$$

$$Sq_4 := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$Sq_4 = 0.011 - 0.7j$$

$$|Sq_4| = 0.7 \quad \arg(Sq_4) = -89.087 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00006 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00006 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + sp_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + sp_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -8.266 \times 10^3$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -6.473 \times 10^3$$

$$Sp_6 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$Sp_6 = -6.473 \times 10^3 - 8.266i \times 10^3$$

$$|Sp_6| = 1.05 \times 10^4 \quad \arg(Sp_6) = -128.064 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + sq_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + sq_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 1.445 \times 10^3$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = 486.733$$

$$Sq_6 := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$Sq_6 = 486.733 + 1.445i \times 10^3$$

$$|Sq_6| = 1.525 \times 10^3 \quad \arg(Sq_6) = 71.381 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00002 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00002 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + np_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + np_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -2.607 \times 10^3$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 1.38 \times 10^3$$

$$\underline{Np}_2 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$Np_2 = 1.38 \times 10^3 - 2.607i \times 10^3$$

$$|Np_2| = 2.949 \times 10^3 \quad \arg(Np_2) = -62.106 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q^3} := \begin{cases} q^3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^3_{i+1} \leftarrow q^3_i + nq_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q^3 \end{cases} \quad \underline{q^4} := \begin{cases} q^4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^4_{i+1} \leftarrow q^4_i + nq_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q^4 \end{cases}$$

$$\underline{a^2} := q^3_{4001} \quad \underline{b^2} := q^4_{4001}$$

$$\frac{a^2}{\sqrt{2}} = -1.381 \times 10^3 \quad \frac{b^2}{\sqrt{2}} = -2.613 \times 10^3$$

$$\underline{Nq_2} := \frac{b^2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^2}{\sqrt{2}}$$

$$Nq_2 = -2.613 \times 10^3 - 1.381i \times 10^3$$

$$|Nq_2| = 2.956 \times 10^3 \quad \arg(Nq_2) = -152.155 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00004 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00004 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q^1} := \begin{cases} q^1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^1_{i+1} \leftarrow q^1_i + np_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q^1 \end{cases} \quad \underline{q^2} := \begin{cases} q^2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^2_{i+1} \leftarrow q^2_i + np_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q^2 \end{cases}$$

$$\underline{a^1} := q^1_{4001} \quad \underline{b^1} := q^2_{4001}$$

$$\frac{a^1}{\sqrt{2}} = -18.078 \quad \frac{b^1}{\sqrt{2}} = 3.756$$

$$Np_4 := \frac{b^1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^1}{\sqrt{2}}$$

$$Np_4 = 3.756 - 18.078i$$

$$|Np_4| = 18.464 \quad \arg(Np_4) = -78.263 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q^3} := \begin{cases} q^3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^3_{i+1} \leftarrow q^3_i + nq_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q^3 \end{cases} \quad \underline{q^4} := \begin{cases} q^4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^4_{i+1} \leftarrow q^4_i + nq_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q^4 \end{cases}$$

$$\underline{a^2} := q^3_{4001} \quad \underline{b^2} := q^4_{4001}$$

$$\frac{a^2}{\sqrt{2}} = -12.761 \quad \frac{b^2}{\sqrt{2}} = -23.651$$

$$Nq_4 := \frac{b^2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^2}{\sqrt{2}}$$

$$Nq_4 = -23.651 - 12.761i$$

$$|Nq_4| = 26.874 \quad \arg(Nq_4) = -151.651 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00006 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00006 \cdot \omega i)$$

$$\underline{\underline{q1}} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + np_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{\underline{q2}} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + np_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{a1}} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -8.264 \times 10^3$$

$$\underline{\underline{b1}} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -6.473 \times 10^3$$

$$Np_6 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$Np_6 = -6.473 \times 10^3 - 8.264i \times 10^3$$

$$|Np_6| = 1.05 \times 10^4 \quad \arg(Np_6) = -128.068 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{\underline{q3}} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + nq_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{\underline{q4}} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + nq_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{a2}} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 1.445 \times 10^3$$

$$\underline{\underline{b2}} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = 486.719$$

$$Nq_6 := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$Nq_6 = 486.719 + 1.445i \times 10^3$$

$$|Nq_6| = 1.525 \times 10^3 \quad \arg(Nq_6) = 71.39 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00002 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00002 \cdot \omega i)$$

$$\underline{\underline{q1}} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + B\beta_i \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{\underline{q2}} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + B\beta_i \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{a1}} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -727.288$$

$$\underline{\underline{b1}} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -3.498 \times 10^3$$

$$B\beta_2 := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$B\beta_2 = -3.498 \times 10^3 - 727.288i$$

$$|B\beta_2| = 3.573 \times 10^3 \quad \arg(B\beta_2) = -168.256 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q^3} := \begin{cases} q^3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^3_{i+1} \leftarrow q^3_i + B\alpha_1 \cdot V\alpha_1 \\ 0.0005 \cdot q^3 \end{cases} \quad \underline{q^4} := \begin{cases} q^4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^4_{i+1} \leftarrow q^4_i + B\alpha_1 \cdot V\beta_1 \\ 0.0005 \cdot q^4 \end{cases}$$

$$\underline{a^2} := q^3_{4001} \quad \underline{b^2} := q^4_{4001}$$

$$\frac{a^2}{\sqrt{2}} = -2.684 \times 10^3 \quad \frac{b^2}{\sqrt{2}} = -949.399$$

$$B\alpha_2 := \frac{b^2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^2}{\sqrt{2}}$$

$$B\alpha_2 = -949.399 - 2.684i \times 10^3$$

$$|B\alpha_2| = 2.847 \times 10^3 \quad \arg(B\alpha_2) = -109.48 \cdot \text{deg}$$

$$V\alpha_i := 1 \cos(0.00004 \cdot \omega i) \quad V\beta_i := 1 \cdot \sin(0.00004 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q^1} := \begin{cases} q^1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^1_{i+1} \leftarrow q^1_i + B\beta_1 \cdot V\alpha_1 \\ 0.0005 \cdot q^1 \end{cases} \quad \underline{q^2} := \begin{cases} q^2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^2_{i+1} \leftarrow q^2_i + B\beta_1 \cdot V\beta_1 \\ 0.0005 \cdot q^2 \end{cases}$$

$$\underline{a^1} := q^1_{4001} \quad \underline{b^1} := q^2_{4001}$$

$$\frac{a^1}{\sqrt{2}} = 909.182 \quad \frac{b^1}{\sqrt{2}} = 501.975$$

$$B\beta_4 := \frac{b^1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^1}{\sqrt{2}}$$

$$B\beta_4 = 501.975 + 909.182i$$

$$|B\beta_4| = 1.039 \times 10^3 \quad \arg(B\beta_4) = 61.096 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q^3} := \begin{cases} q^3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^3_{i+1} \leftarrow q^3_i + B\alpha_1 \cdot V\alpha_1 \\ 0.0005 \cdot q^3 \end{cases} \quad \underline{q^4} := \begin{cases} q^4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q^4_{i+1} \leftarrow q^4_i + B\alpha_1 \cdot V\beta_1 \\ 0.0005 \cdot q^4 \end{cases}$$

$$\underline{a^2} := q^3_{4001} \quad \underline{b^2} := q^4_{4001}$$

$$\frac{a^2}{\sqrt{2}} = 487.953 \quad \frac{b^2}{\sqrt{2}} = -862.093$$

$$B\alpha_4 := \frac{b^2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a^2}{\sqrt{2}}$$

$$B\alpha_4 = -862.093 + 487.953i$$

$$|B\alpha_4| = 990.607 \quad \arg(B\alpha_4) = 150.49 \cdot \text{deg}$$

$$\begin{aligned} \text{Змінюється } q & \quad n := 0 & \quad m := 4000 \\ V_{\alpha_i} & := 1 \cos(0.00001 \cdot \omega i) & \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00001 \cdot \omega i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{q1} & := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} & \quad \underline{q2} & := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{a1} & := q1_{4001} & \quad \underline{b1} & := q2_{4001} \\ \frac{a1}{\sqrt{2}} & = -102.038 & \quad \frac{b1}{\sqrt{2}} & = 170.934 \end{aligned}$$

$$I_{A1} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A1} = 170.934 - 102.038i$$

$$|I_{A1}| = 199.074 \quad \arg(I_{A1}) = -30.835 \cdot \text{deg}$$

$$\begin{aligned} \underline{q3} & := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} & \quad \underline{q4} & := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{a2} & := q3_{4001} & \quad \underline{b2} & := q4_{4001} \\ \frac{a2}{\sqrt{2}} & = -96.948 & \quad \frac{b2}{\sqrt{2}} & = -173.881 \end{aligned}$$

$$I_{B1} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B1} = -173.881 - 96.948i$$

$$|I_{B1}| = 199.081 \quad \arg(I_{B1}) = -150.858 \cdot \text{deg}$$

$$\begin{aligned} \underline{q1} & := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} & \quad \underline{q2} & := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{a1} & := q1_{4001} & \quad \underline{b1} & := q2_{4001} \\ \frac{a1}{\sqrt{2}} & = 179.087 & \quad \frac{b1}{\sqrt{2}} & = 2.652 \end{aligned}$$

$$I_{C1} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C1} = 2.652 + 179.087i$$

$$|I_{C1}| = 179.107 \quad \arg(I_{C1}) = 89.152 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00003 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00003 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = 1.138$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -1.798$$

$$\underline{I_{A3}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A3} = -1.798 + 1.138i$$

$$|I_{A3}| = 2.128 \quad \arg(I_{A3}) = 147.674 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 1.126$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = -1.798$$

$$\underline{I_{B3}} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B3} = -1.798 + 1.126i$$

$$|I_{B3}| = 2.122 \quad \arg(I_{B3}) = 147.948 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = 1.001$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -1.797$$

$$\underline{I_{C3}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C3} = -1.797 + 1.001i$$

$$|I_{C3}| = 2.057 \quad \arg(I_{C3}) = 150.869 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00005 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00005 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -6.058$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 10.12$$

$$\underline{I_{A5}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A5} = 10.12 - 6.058j$$

$$|I_{A5}| = 11.795 \quad \arg(I_{A5}) = -30.907 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 11.86$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = 0.231$$

$$\underline{I_{B5}} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B5} = 0.231 + 11.86j$$

$$|I_{B5}| = 11.863 \quad \arg(I_{B5}) = 88.884 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -5.794$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -10.351$$

$$\underline{I_{C5}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C5} = -10.351 - 5.794j$$

$$|I_{C5}| = 11.862 \quad \arg(I_{C5}) = -150.764 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = 5.779$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -9.487$$

$$\underline{I_{A7}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A7} = -9.487 + 5.779j$$

$$|I_{A7}| = 11.108 \quad \arg(I_{A7}) = 148.655 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 5.392$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = 9.701$$

$$\underline{I_{B7}} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B7} = 9.701 + 5.392j$$

$$|I_{B7}| = 11.099 \quad \arg(I_{B7}) = 29.067 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -11.162$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -0.214$$

$$\underline{I_{C7}} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C7} = -0.214 - 11.162j$$

$$|I_{C7}| = 11.164 \quad \arg(I_{C7}) = -91.099 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00009 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00009 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = 0.052$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -1.501 \times 10^{-3}$$

$$I_{A9} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A9} = -1.501 \times 10^{-3} + 0.052i$$

$$|I_{A9}| = 0.052 \quad \arg(I_{A9}) = 91.643 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 0.04$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = -1.155 \times 10^{-3}$$

$$I_{B9} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B9} = -1.155 \times 10^{-3} + 0.04i$$

$$|I_{B9}| = 0.04 \quad \arg(I_{B9}) = 91.643 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -0.084$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 2.412 \times 10^{-3}$$

$$I_{C9} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C9} = 2.412 \times 10^{-3} - 0.084i$$

$$|I_{C9}| = 0.084 \quad \arg(I_{C9}) = -88.357 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\alpha_i} := 1 \cos(0.00011 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_i} := 1 \cdot \sin(0.00011 \cdot \omega i)$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{A_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{A_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = 0.052$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = -1.835 \times 10^{-3}$$

$$I_{A11} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A11} = -1.835 \times 10^{-3} + 0.052i$$

$$|I_{A11}| = 0.052 \quad \arg(I_{A11}) = 92.008 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q3} := \begin{cases} q3_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q3_{i+1} \leftarrow q3_i + i_{B_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q3 \end{cases} \quad \underline{q4} := \begin{cases} q4_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q4_{i+1} \leftarrow q4_i + i_{B_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q4 \end{cases}$$

$$\underline{a2} := q3_{4001}$$

$$\frac{a2}{\sqrt{2}} = 0.04$$

$$\underline{b2} := q4_{4001}$$

$$\frac{b2}{\sqrt{2}} = -1.412 \times 10^{-3}$$

$$I_{B11} := \frac{b2}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a2}{\sqrt{2}}$$

$$I_{B11} = -1.412 \times 10^{-3} + 0.04i$$

$$|I_{B11}| = 0.04 \quad \arg(I_{B11}) = 92.008 \cdot \text{deg}$$

$$\underline{q1} := \begin{cases} q1_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q1_{i+1} \leftarrow q1_i + i_{C_i} \cdot V_{\alpha_i} \\ 0.0005 \cdot q1 \end{cases} \quad \underline{q2} := \begin{cases} q2_n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in n..m \\ q2_{i+1} \leftarrow q2_i + i_{C_i} \cdot V_{\beta_i} \\ 0.0005 \cdot q2 \end{cases}$$

$$\underline{a1} := q1_{4001}$$

$$\frac{a1}{\sqrt{2}} = -0.084$$

$$\underline{b1} := q2_{4001}$$

$$\frac{b1}{\sqrt{2}} = 2.948 \times 10^{-3}$$

$$I_{C11} := \frac{b1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{a1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{C11} = 2.948 \times 10^{-3} - 0.084i$$

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж,» *Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та устаткування*, № 1, с. 42-49, 2019.

[2] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 1, с. 24-30, 2019.

[3] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,» *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетика: надійність та енергоефективність*, № 14(1339), с. 78-82, 2019.

[4] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Умовні потужності нульової послідовності за несиметричних несинусоїдних режимів трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Вип. 38. С. 144-151. 2019.

[5] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 3, с.13-20, 2019.

[6] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та О. В. Степура, «Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів,» *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 3(271), с. 220-225, 2019.

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що не внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[7] О. В. Степура, «Приймальний контроль за кількісною ознакою з використанням економічного критерію оптимальності,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 154-156, 1998.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості методів виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії», на *Monografia pokonferencyjna. Science, Research, Development #16. Technics and technology*, Barcelona, 2019, pp. 58-67.

[9] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення нелінійних та несиметричних споживачів», на *Science, Research, Development #18 (Наука, Исследования, Развитие #18)*, Ваку/Баку, 2019, с. 13-17.