

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 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.

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 STATS 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

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 таких: [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.

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. Ключев, 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 Baggi. 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.