

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

СТЕПУРА ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.1

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

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бурбело Михайло Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електротехнічних систем
електроспоживання та енергетичного
менеджменту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки
енергосистем;

кандидат технічних наук, доцент
Соломчак Олег Володимирович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки.

Захист відбудеться “ 19 ” грудня 2019 р. о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 14 ” листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області виявлення джерел спотворень, 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: [1] – 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; [2] – обґрунтовано інформативні величини для виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей; [3] – 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; [4] – 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; [5] – 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; [6] – запропоновано спосіб зменшення похибок вимірювання потужностей в динамічних режимах навантажень; [7] – запропоновано застосування економічного критерію оптимальності в процесі контролю; [8] – проаналізовано чутливість виявлення споживачів, які погіршують якість електроенергії, різними методами і показано, що найбільш чутливим є метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей; [9] – виконано порівняння двох лінійних перетворень миттєвих напруг і струмів з системи фазних координат в систему симетричних складових. Результати теоретичних досліджень, що викладені в [1]–[9], 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі дослідження. Сформульовано наукову новизну та положення, що виносяться на захист. Розглянуто практичне значення та впровадження одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

Перший розділ дисертації присвячений огляду існуючих методів виявлення джерел спотворень. Огляд методів дозволяє зробити такі висновки:

1. Методи визначення 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 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 оснований на статистичній обробці вимірної 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.

У другому розділі показано, що в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж миттєві активну n_p та реактивну n_q потужності пульсацій можна подати сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів:

$$n_p = p - P = n_{2p} + s_p; n_q = q - Q = n_{2q} + s_q, \quad (1)$$

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.

Складники, що зумовлені несиметрією, представлено миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності

$$n_{2p} = p_{2p} - P_{2p}; \quad n_{2q} = q_{2p} - Q_{2p}, \quad (2)$$

де p_{2p} та q_{2p} – складники миттєвих потужностей, що зумовлені несиметрією напруг і струмів, які можуть бути визначені за формулами:

$$p_{2p} = u_{\alpha} i'_{\alpha} - u'_{\beta} i_{\beta}; \quad q_{2p} = u'_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i'_{\beta}, \quad (3)$$

де штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів. За умов несинусоїдності фазовий зсув напруг повинен забезпечуватися шляхом зсуву усіх гармонічних складників на -90 ел. градусів.

Складники миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності мають постійні складові

$$P_{2p} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{2p}(t) dt; \quad Q_{2p} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{2p}(t) dt, \quad (4)$$

які характеризують несиметрію струмів і напруг на основній гармоніці.

Складники потужності спотворення, що зумовлені несинусоїдністю, визначено як різницю потужності пульсацій та миттєвої умовної потужності зворотної послідовності:

$$s_p = (p - P) - (p_2 - P_2); \quad s_q = (q - Q) - (q_2 - Q_2). \quad (5)$$

Для оцінювання загального рівня пульсацій активної та реактивної потужностей пропонується використати середньоквадратичні значення потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення

$$N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; \quad N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}. \quad (6)$$

Складники потужності гармонічних спотворень можна визначити шляхом інтегрування квадратів миттєвих потужностей спотворень на періоді T напруги живлення

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_p^2(t) dt}; \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_q^2(t) dt}. \quad (7)$$

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

$$N_{2p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2p}^2(t) dt}; \quad N_{2q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2q}^2(t) dt}. \quad (8)$$

За наявності канонічних гармонік, з яких п'ята, одинадцята і т.д. гармоніки утворюють системи зворотної послідовності, а шоста, тринадцята і т.д. – системи прямої послідовності, складники комплексної потужності несиметрії можна визначити шляхом інтегрування виділеної другої гармоніки миттєвих потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення:

$$\operatorname{Re} \underline{N}_{2p} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \sin 2\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{N}_{2p} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \cos 2\omega t dt; \quad (9)$$

$$\operatorname{Re} \underline{N}_{2q} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \sin 2\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{N}_{2q} \approx \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \cos 2\omega t dt. \quad (10)$$

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

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{p.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{p.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_p \cos 6\omega t dt; \quad (11)$$

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{q.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{q.6} = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T n_q \cos 6\omega t dt. \quad (12)$$

Проаналізовано можливість виявлення джерел спотворень за складниками пульсуючої потужності в несиметричному несинусоїдному режимі, для якого струм навантаження містить п'яту та шосту гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки (рис. 1). Потужність навантаження основної гармоніки $S_1 = 1405 e^{j30^\circ} = 1216,8 + j702,5$ кВ·А.

Розраховані значення потужностей пульсацій: $N_p = 84,1$ кВ·А; $N_q = 109,4$ кВ·А, гармонічних спотворень: $S_p = 48,7$ кВ·А; $S_q = 83,2$ кВ·А, зворотної послідовності: $N_{2p} = 68,5$ кВ·А; $N_{2q} = 68,5$ кВ·А (середні значення: $P_{2p} = 42$ кВ·А, $Q_{2p} = 24$ кВ·А). Значення потужностей спотворення (11), (12):

$$\underline{S}_{p.6} = 48,0 - j8,3 = 48,7 e^{-j9,8^\circ} \text{ кВ·А}, \quad \underline{S}_{q.6} = -81,1 - j4,8 = 83,3 e^{-j176,7^\circ} \text{ кВ·А}.$$

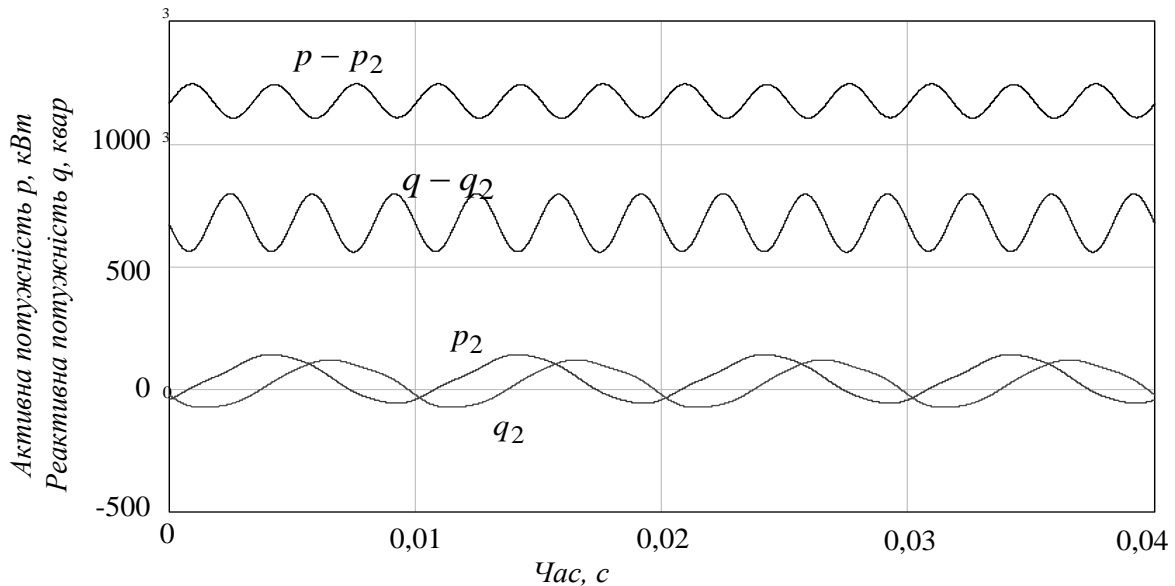


Рисунок 1 – Залежності p_2 , q_2 , коливання яких викликані лише несиметрією, і $p - p_2$, $q - q_2$, коливання яких викликані лише несинусоїдністю

Третя, шоста, дев'ята, ..., гармоніки, які утворюють напругу і струм нульової послідовності в трифазних мережах з заземленою нейтраллю за симетричного режиму не впливають на ці потужності.

У третьому розділі обґрунтовано доцільність застосування системи узагальнених миттєвих симетричних складових

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) - f'_\beta(t)), \quad f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) + f'_\beta(t)), \quad (13)$$

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

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

пруга або струм в системі $\alpha\beta$ -координат; штрихом позначено фазовий зсув усіх гармонік миттєвих величин на -90 ел. градусів, які разом з миттєвими напругою та струмом нульової послідовності $f_0(t) = \frac{1}{3}(f_A(t) + f_B(t) + f_C(t))$ утворюють ортогональну систему.

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

На рис. 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.

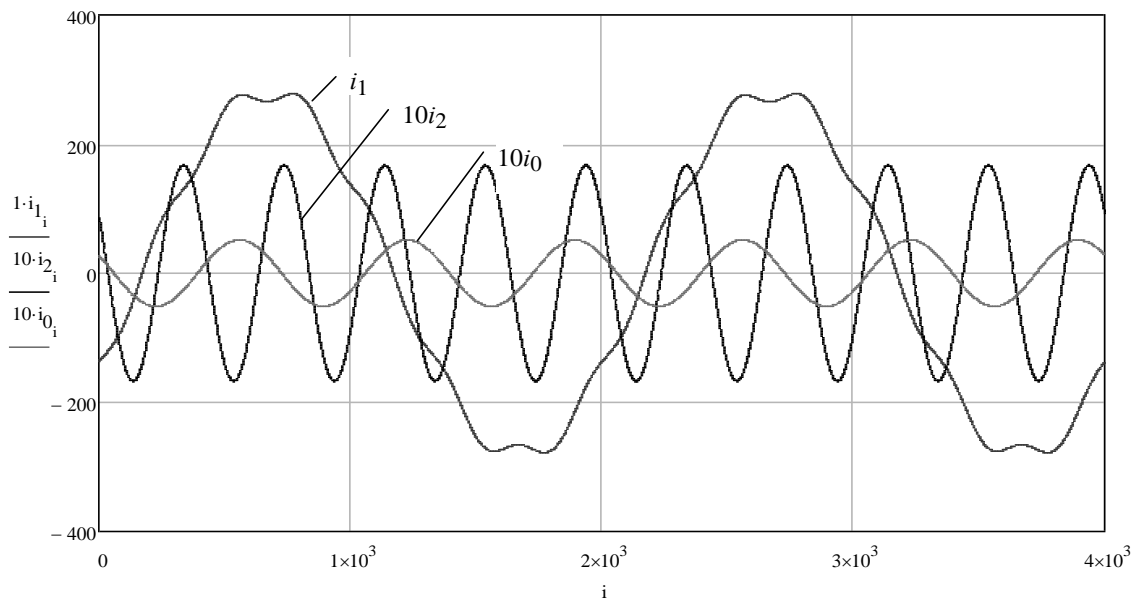


Рисунок 2 – Залежності узагальнених миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за симетричного режиму

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).

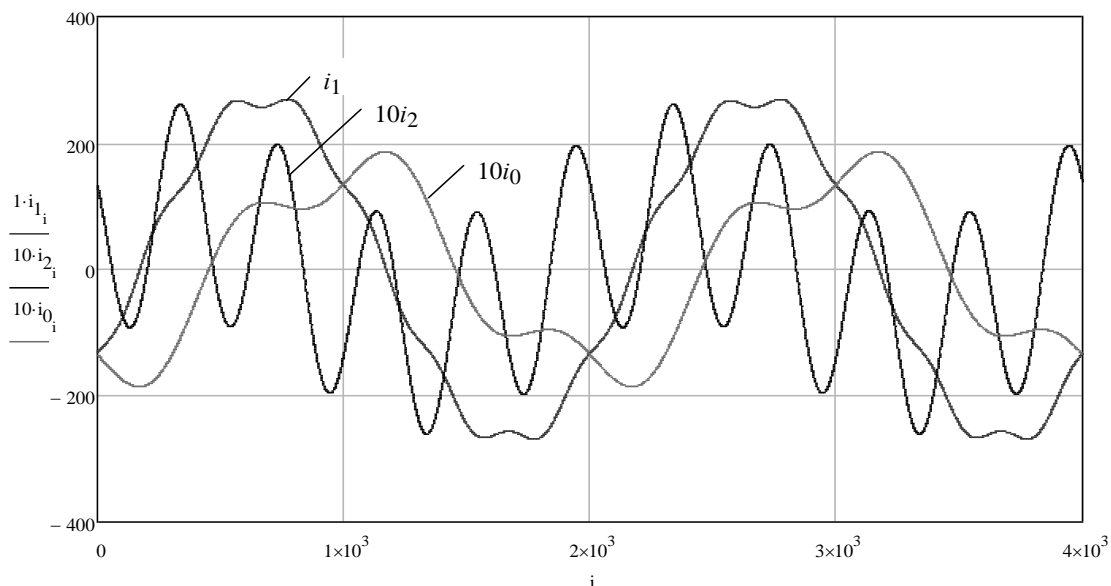


Рисунок 3 – Залежності узагальнених миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за несиметричного режиму

Миттєві умовні потужності можуть бути записані через симетричні складові миттєвих напруг і струмів прямої та зворотної послідовностей, відповідно:

$$\begin{aligned} p_{2p} &= 3(u_1 i_2 + u_2 i_1); & q_{2p} &= 3(u'_1 i_2 + u'_2 i_1); \\ p_{2q} &= 3(u_1 i_2 - u_2 i_1); & q_{2q} &= 3(u'_1 i_2 - u'_2 i_1). \end{aligned} \quad (14)$$

З (14) можна визначити окремі складники миттєвих умовних потужностей, які визначаються струмом і напругою зворотної послідовності:

$$p_{i_2} = 3u_1 i_2 = 0,5(p_{2p} + p_{2q}) = 0,5(u_\alpha - u'_\beta)(i_\alpha + i'_\beta); \quad (15)$$

$$q_{i_2} = 3u'_1 i_2 = 0,5(q_{2p} + q_{2q}) = 0,5(u'_\alpha + u_\beta)(i_\alpha + i'_\beta);$$

$$p_{u_2} = 3u_2 i_1 = 0,5(p_{2p} - p_{2q}) = 0,5(u_\alpha + u'_\beta)(i_\alpha - i'_\beta); \quad (16)$$

$$q_{u_2} = 3u'_2 i_1 = 0,5(q_{2p} - q_{2q}) = 0,5(u'_\alpha - u_\beta)(i_\alpha - i'_\beta).$$

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

$$P_{i_2} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{i_2}(t) dt; \quad Q_{i_2} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{i_2}(t) dt; \quad (17)$$

$$P_{u_2} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{u_2}(t) dt; \quad Q_{u_2} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{u_2}(t) dt.$$

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

$$P_{ски_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{i_2} - P_{i_2})^2(t) dt}; \quad Q_{ски_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{i_2} - Q_{i_2})^2(t) dt}; \quad (18)$$

$$P_{ску_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{u_2} - P_{u_2})^2(t) dt}; \quad Q_{ску_2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{u_2} - Q_{u_2})^2(t) dt}.$$

Розглянемо симетричний та несиметричний несинусоїдні режими, залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей яких наведені на рис. 2 та рис. 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. 4, а за несиметричного навантаження – на рис. 5.

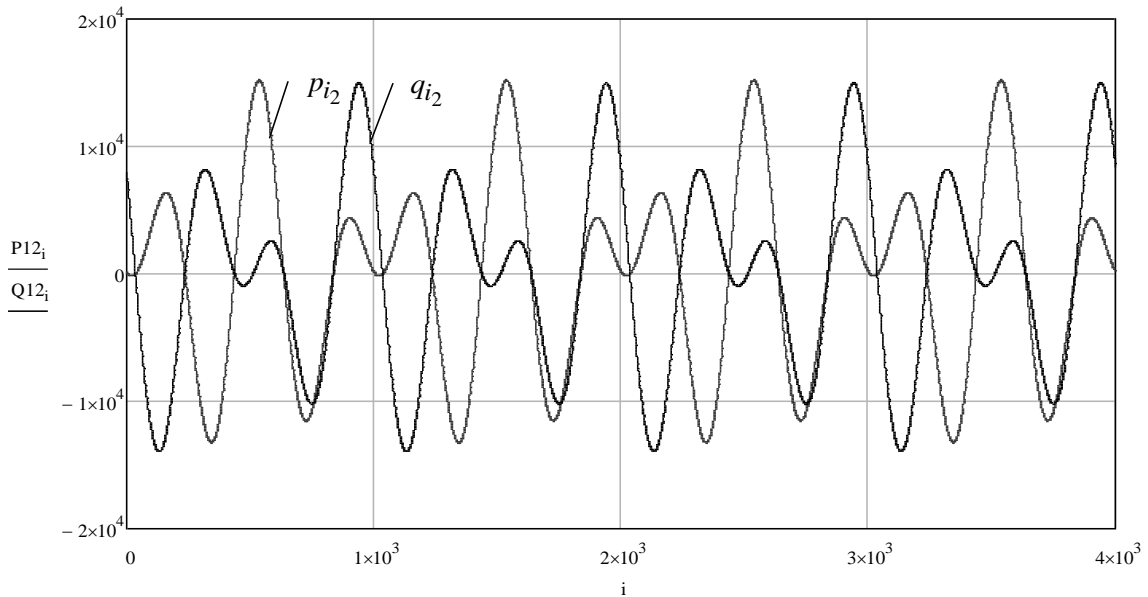


Рисунок 4 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за симетричних струмів фаз

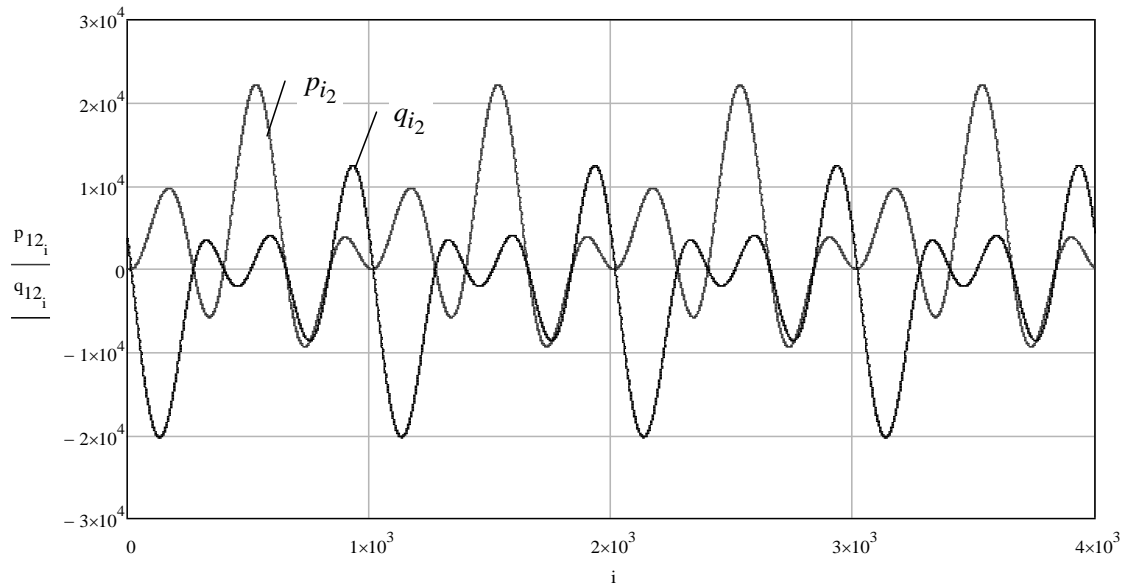


Рисунок 5 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за несиметричних струмів фаз

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: $P_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, який виник на Дністровській ГАЕС під час роботи гідроагрегатів в насосному режимі. Осцилограми побудовано з використанням інформаційно-вимірювального комплексу «Регіна» з інтервалом дискретизації 1 мс (20 даних за період).

На рис. 6 зображено залежності миттєвих струмів прямої та зворотної послідовностей $i_1(t)$, $i_2(t)$, а також струму нульової послідовності $i_0(t)$. На рис. 7 зображено залежності $p_{i_2} = 3u_{i_1}i_2$, $p_{u_2} = 3u_2i_1$.

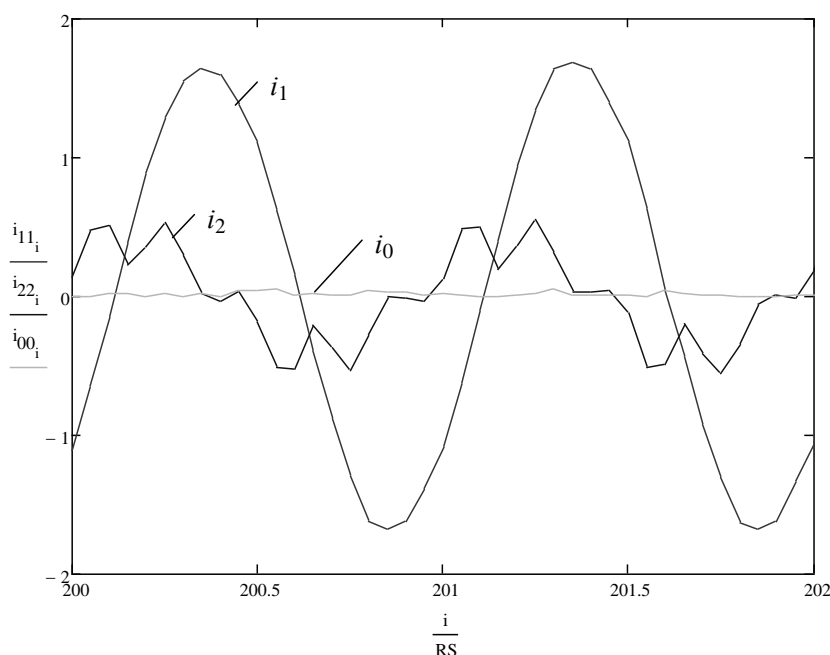


Рисунок 6 – Залежності узагальнених струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей на Дністровській ГАЕС

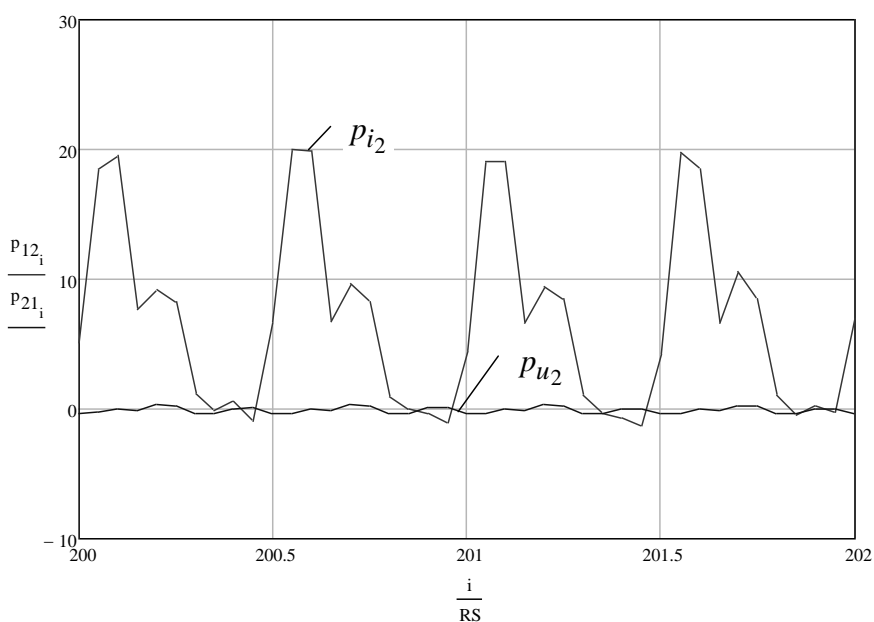


Рисунок 7 – Залежності p_{i_2} та p_{u_2} на Дністровській ГАЕС

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.

Для виявлення споживачів, які створюють миттєвий струм нульової послідовності, використано умовні потужності нульової послідовності

$$\begin{aligned} p_{i_0} &= 3u_1 i_0; q_{i_0} = 3u'_1 i_0; \\ p_{u_0} &= 3u_0 i_1; q_{u_0} = 3u'_0 i_1. \end{aligned} \quad (19)$$

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} , відповідно:

$$\begin{aligned} P_{i_0} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{i_0}(t) dt; Q_{i_0} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{i_0}(t) dt; \\ P_{u_0} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{u_0}(t) dt; Q_{u_0} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{u_0}(t) dt \end{aligned} \quad (20)$$

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

Середньоквадратичні значення центрованих величин

$$\begin{aligned} P_{ски_0} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{i_0}(t) - P_{i_0})^2 dt}; Q_{ски_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{i_0}(t) - Q_{i_0})^2 dt}; \\ P_{ску_0} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_{u_0}(t) - P_{u_0})^2 dt}; Q_{ску_0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_{u_0}(t) - Q_{u_0})^2 dt} \end{aligned} \quad (21)$$

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

Розглянемо симетричний та несиметричний несинусоїдні режими, залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей для яких наведені на рис. 2 та рис. 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. 8. Се-

редньоквадратичні значення цих потужностей: $P_{cki_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{cki_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

За несиметричного навантаження (рис. 9) 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: $P_{cki_0} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{cki_0} = 2,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. 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.

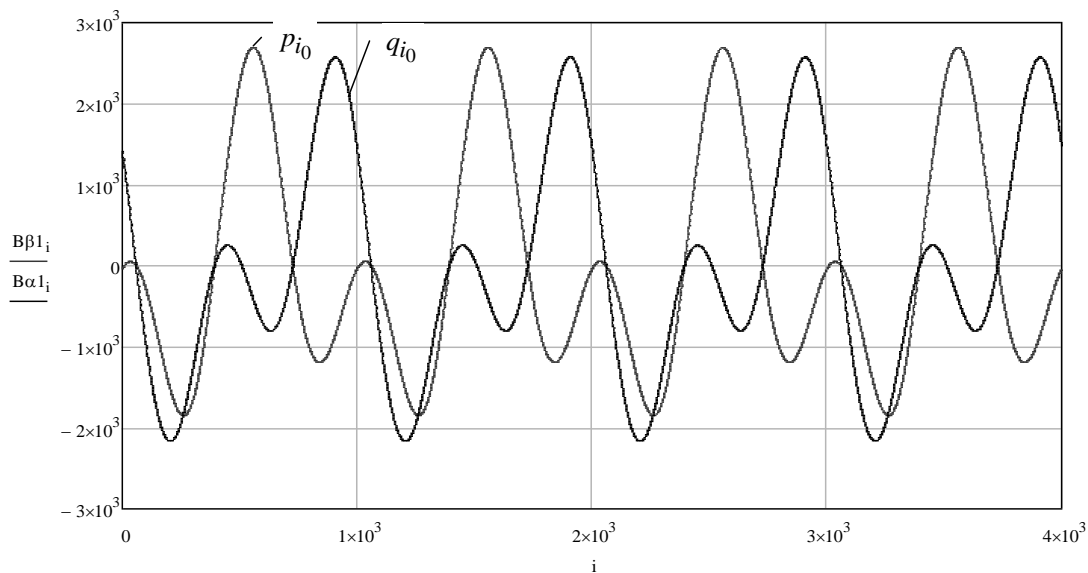


Рисунок 8 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за несинусоїдних симетричних струмів фаз

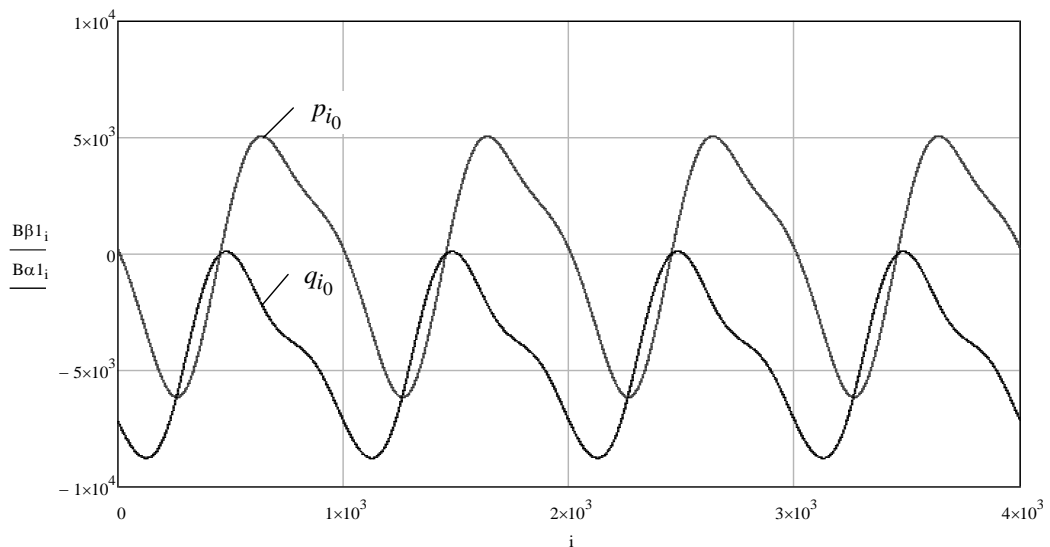


Рисунок 9 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за несинусоїдних несиметричних струмів фаз

Другий підхід оснований на використанні миттєвих напруг і струмів в системі $\alpha\beta 0$ -координат:

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

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

Умовні потужності q_{β} і q_{α} доцільно подати двома складниками

$$q_{\beta i_0} = i_0 u_{\alpha}; \quad q_{\beta u_0} = -i_{\alpha} u_0; \quad (22)$$

$$q_{\alpha i_0} = -i_0 u_{\beta}; \quad q_{\alpha u_0} = i_{\beta} u_0. \quad (23)$$

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.

Встановлено, що потужності q_{α} , q_{β} , які характеризують незрівноваженість режиму, залежать від симетричних складових напруг і струмів зворотної послідовностей:

$$\sqrt{2}q_{\beta} = p_{10} + p_{20}; \quad \sqrt{2}q_{\alpha} = q_{10} + q_{20}, \quad (24)$$

де

$$\begin{aligned} p_{10} &= 3(u_1 i_0 - u_0 i_1); & q_{10} &= 3(u_1' i_0 - u_0 i_1'); \\ p_{20} &= 3(u_2 i_0 - u_0 i_2); & q_{20} &= 3(u_2' i_0 - u_0 i_2'). \end{aligned} \quad (25)$$

Однак помилка при цьому є порівняно невеликою.

Для дослідження впливу опору системи (потужності і схеми сполучення обмоток силового трансформатора) розглянуто несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту, сьому, дев'яту, одинадцяту, ... гармоніки, амплітуди яких становлять: 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. 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 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 напругою зворотної та нульової послідовності, досить значні (табл. 2). Середні потужностей, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності, близькі до нуля.

Таблиця 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.

У четвертому розділі проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Аналіз чутливості виконується за наявності додаткових джерел спотворень, які приєднані разом з контрольованим споживачем до спільного вузла навантаження.

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. Розглянемо, наприклад, 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. Потужність навантаження споживача на основній гармоніці: $\underline{S}_{n1} = 113 + j65$ кВ·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». Оскільки у даному випадку основою для формування струму зворотної та нульової послідовності є, 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}_{n1} будуть:

$$T_{Pi2} = \frac{P_{cki_2}}{K_{I(5)} S_{n1}} = \frac{5,5}{0,05 \cdot 130} = 0,85; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{cki_2}}{K_{I(5)} S_{n1}} = \frac{9,3}{0,05 \cdot 130} = 1,43;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{cki_0}}{K_{I(3)} S_{n1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92; \quad T_{Qi0} = \frac{Q_{cki_0}}{K_{I(3)} S_{n1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92,$$

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

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).

У п'ятому розділі практично реалізовано АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії (рис. 10).

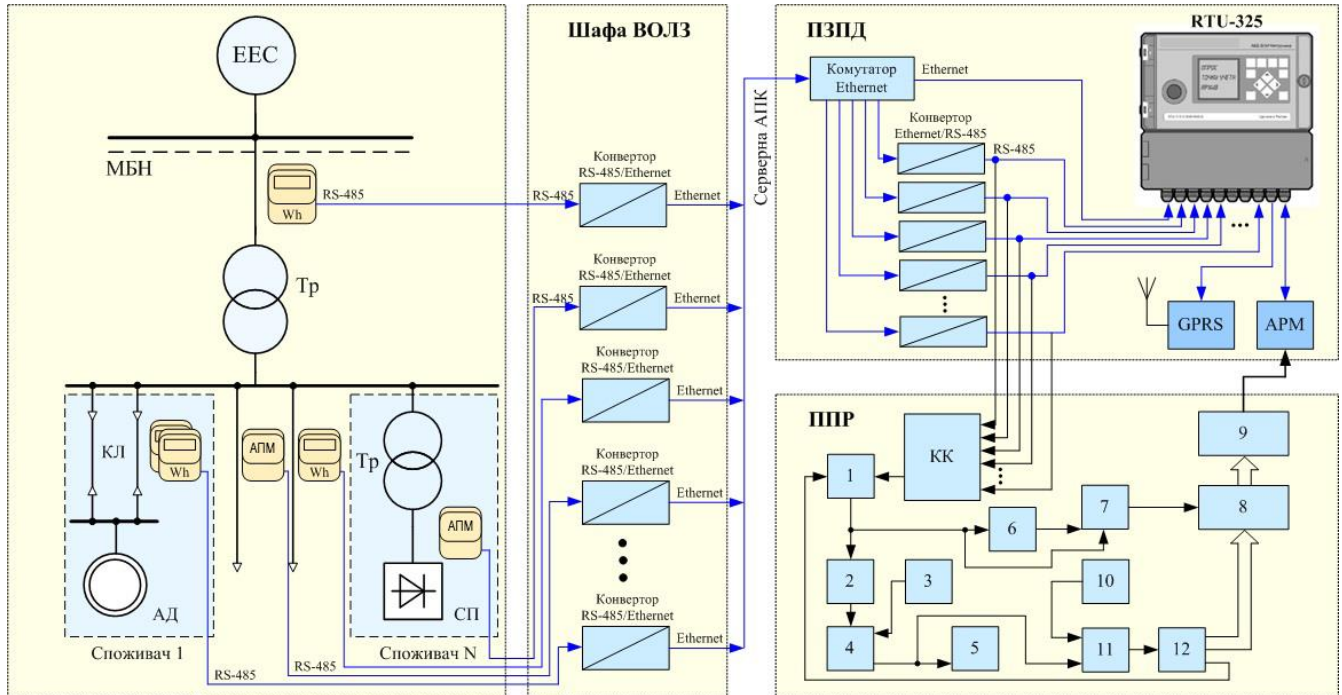


Рисунок 10 – Структурна схема АСКОЕ з функцією виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів

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 гар-

моніки; 8 – Блок запам'ятовування рівнів спотворення споживачів; 9 – блок узгодження; 10 – генератор тактових імпульсів; 11 - елемент “Г”; 12 – розподілювач тактів.

Розроблено алгоритм для отримання інформації про дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, який забезпечує практично повну компенсацію динамічної похибки за швидкозмінних навантажень, при побудові якого використано підхід, що оснований на усередненні на періоді або на половині періоду:

$$P_2(t) = 2 \cdot P_{2(T/2)}(t) - P_{2(T)}(t); \quad Q_2(t) = 2 \cdot Q_{2(T/2)}(t) - Q_{2(T)}(t). \quad (26)$$

На рис. 11 зображено структурну схему вимірювального каналу зворотної послідовності з вимірюваними величинами p_{i_2} , q_{i_2} та p_{u_2} , q_{u_2} .

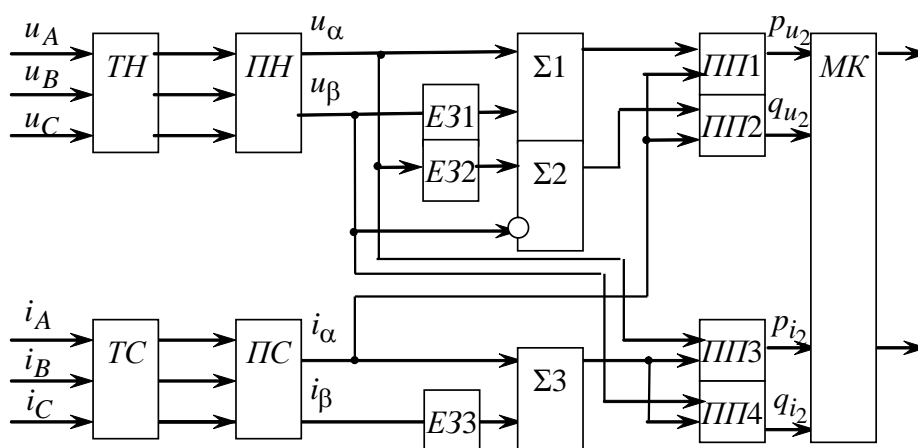


Рисунок 11 – Структурна схема вимірювального каналу зворотної послідовності

Вимірювальний канал складається з трансформатора напруги $ТН$, трансформаторів струму $ТС$, перетворювача фазних напруг $ПН$, перетворювача фазних струмів $ПС$, елементів затримки $E31$ – $E33$, суматорів $\Sigma 1$ – $\Sigma 3$, перетворювачів потужності $ППП 1, \dots, ППП 4$, мікроконтролера $МК$.

В основу реалізації вимірювального каналу покладено затримку в часі миттєвих значень струмів і напруг на чверть періоду:

$$\begin{aligned} \hat{p}_{i_2}(t) &\approx u_{\alpha}(t)(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{i_2}(t) &\approx u_{\beta}(t)(i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t - T/4)); \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_{u_2}(t) &\approx i_{\alpha}(t)(u_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t - T/4)); \\ \hat{q}_{u_2}(t) &\approx i_{\alpha}(t)(u_{\alpha}(t - T/4) + u_{\beta}(t)). \end{aligned} \quad (28)$$

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 ($T_{i_2} > 1, T_{i_0} > 1$). 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 АСКОВЕ 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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 задвальних 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.

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.

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_{i2}, q_{i2} та p_{i0}, q_{i0} , 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_{u2}, q_{u2} та p_{u0}, q_{u0} , які є добутком миттєвих струму прямої послідовності на напругу, відповідно, зворотної та нульової послідовностей.

Проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей.

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

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

ABSTRACT

Stepura A. V. Identification and estimation of distortion sources of electricity quality in distribution electric networks. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

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

It is shown that in the asymmetric non-sinusoidal modes of electric networks, the pulsating power contains two components, which are due to asymmetry and non-sinusoidal stresses and currents. The constituents due to asymmetry are represented by instant conditional capacities of the reverse sequence. The constituents the power of distortion due to the non-sinusoidality is defined as the difference between the pulsating power and the instantaneous conditional power of the reciprocal sequence. Expressions are obtained to determine the reciprocal and distortion capacities in the integral and spectral recording forms.

The expediency of the application of the system of generalized instant symmetric components and the basis of the conditional capacities of the reverse and zero sequences determined on their basis for the determination of consumers that distort the quality of the electric power is substantiated.

The possibility of detecting and evaluating the influence of distortion sources (asymmetry and higher harmonics) on the quality of the electricity of three-phase networks using instantaneous conditional capacities of the reverse and zero sequences p_{i_2}, q_{i_2} and p_{i_0}, q_{i_0} , which is the product of instantaneous direct-sequence voltage, in accordance to, the reverse and zero sequences flow. Towards to assess the fault of the electricity supply organization, which is ineffective construction of distribution network used instantaneous conditional capacities p_{u_2}, q_{u_2} and p_{u_0}, q_{u_0} , which are the product of instantaneous direct-current currents on the voltage, in accordance to, of the reverse and zero sequences.

On the basis of the theory of instantaneous power, the asymmetrical non-sinusoidal modes of three-phase networks with grounded neutral are analyzed. It is shown that the conditional capacities of the zero sequence and, respectively, the active and reactive conditional capacities of the zero sequence contain elements that are due to asymmetry and nonsynosity q_{β} and q_{α} , which are characterized by a constant and an alternating component respectively. The instantaneous conditional power is proposed q_{β} and q_{α} divided into instantaneous conditional capacities $q_{\beta i_0}, q_{\alpha i_0}$, which are determined by the current of the zero sequence, and the instantaneous conditional capacities p_{u_0}, q_{u_0} , which are determined by the voltage of the zero sequence.

It is shown that in the presence of harmonic distortions, the mean square values of conditional capacities p_{i_2}, q_{i_2} and p_{i_0}, q_{i_0} are increasing and ranging from one to ten percent relative to the main power created by the voltage and current of the main frequency of the direct sequence. At the same time, the increase p_{u_2}, q_{u_2} and

p_{u_0}, q_{u_0} indicates the lack of power transformers and the inappropriate use of transformers with the scheme of winding connection "star / star with zero" for powering nonlinear consumers. In the case of load asymmetry, the average values of these quantities increase.

The sensitivity of detection of nonlinear consumers that distorts the quality of electric power by the method of conditional capacities is analyzed, which is based on the use of the mean square values of the conditional capacities of the reverse and zero sequences. In order to evaluate the sensitivity, it is proposed to use the ratio of the mean square values of the conditional active and reactive capacities of the reverse and zero sequences to the value of the total power of the harmonic component, which is the basis for forming the currents of the corresponding sequences. It is shown that sensitivity is high enough for all indicators. Load imbalance does not reduce the sensitivity of the method.

Increasing the content of higher harmonics by third-party users (systems) does not affect the sensitivity of consumers with different distortion. Some decrease in sensitivity occurs for consumers with the same nature of distortions of the consumer and the system, which leads to overlaying the harmonic currents of the system on the currents of the consumer by amplifying or weakening them. In this case, the sensitivity remains high ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). It is shown that the method of conditional capacities of the return and zero sequences provides reliable identification of consumers whose current of distortion is 10% or more of the total distortion current of all consumers (systems).

Practically implemented automated monitoring system for electricity accounting with the function of detection and evaluation of the impact of nonlinear and asymmetric consumers on the deterioration of the quality of electricity.

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

АННОТАЦИЯ

Степура О. В. Выявление и оценка источников искажений качества электроэнергии в распределительных электрических сетях. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 „Электрические станции, сети и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Обоснована целесообразность применения системы мгновенных симметричных составляющих и определенных на их основе условных мощностей обратной и нулевой последовательностей для выявления потребителей, искажающие качество электроэнергии.

Проанализирована возможность выявления и оценки влияния источников искажений (несимметрии и высших гармоник) на качество электроэнергии трехфазных сетей с использованием мгновенных условных мощностей обратной и нулевой последовательностей p_{i_2}, q_{i_2} и p_{i_0}, q_{i_0} , которые являются

произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток, соответственно, обратной и нулевой последовательностей. Для оценки вины энергоснабжающей организации, заключающейся в неэффективном построении распределительной сети, использованы мгновенные условные мощности P_{u2}, Q_{u2} и P_{u0}, Q_{u0} , которые являются произведением мгновенных тока прямой последовательности на напряжение, соответственно, обратной и нулевой последовательностей.

Проанализированы чувствительность обнаружения нелинейных потребителей методом условных мощностей, основанным на использование среднеквадратических значений условных мощностей обратной и нулевой последовательностей.

Практически реализовано АСКУЭ с функцией обнаружения и оценки влияния нелинейных и несимметричных потребителей на ухудшение качества электроэнергии.

Ключевые слова: выявление источников искажения, качество электроэнергии, распределительные электрические сети, условные мощности обратной и нулевой последовательностей, нелинейные и несимметричные потребители.

Підписано до друку 07.11.2019 р. Формат 29,7 x 421/4.

Наклад 100 прим. Зам. № 2019 - 152.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-39