

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

СІРОТІН ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.31

КОМПЕНСАЦІЯ ТА ОБЛІК РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ З НЕСИМЕТРИЧНИМИ РЕЖИМАМИ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Харків–2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри автоматизація енергосистем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Юрченко Олег Миколайович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України, м. Київ ,
завідувач відділу транзисторних перетворювачів

доктор технічних наук, професор
Мороз Олександр Миколайович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків,
завідувач кафедри електропостачання та енергетичного
менеджменту

доктор технічних наук, доцент
Саприка Олександр Вікторович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків,
професор кафедри електропостачання міст

Захист відбудеться “14” травня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “04” квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На всіх стадіях виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії (ЕЕ) задача скорочення її втрат, створення оптимального режиму її споживання, підвищення точності обліку та поліпшення якості постачання та споживання набувають все більшої актуальності. Неідеальне (активно-реактивне, несиметричне і нелінійне) навантаження в точці підключення (ТПі) до електротехнічної системи споживає не тільки ЕЕ активної потужності, але і ЕЕ неактивних складових повної потужності (ПП). Для більшості таких навантажень споживання ЕЕ неактивних складових обумовлено технологічними причинами і забезпечує нормальний режим роботи неідеального навантаження, що має довгостроковий характер. Неактивні складові ПП приводять до додаткових втрат в електросистемі, погіршуючи якість електропостачання. Так, несиметричне навантаження приводить не тільки до додаткових втрат в системі і підвищеним вимогам до джерел генерації, але і до пульсації потоку енергії, несиметрії напруг, до несиметричних режимів.

Ефективним вирішенням задачі скорочення втрат і підвищення точності обліку ЕЕ є застосування компенсуючих пристроїв (КП) і засобів обліку ЕЕ. Засоби обліку вимірюють ЕЕ активної потужності (обумовлену симетрією чисто активних елементів навантаження) і ЕЕ реактивної потужності (обумовлену симетрією чисто реактивних елементів навантаження). Однак неактивна складова ПП, що обумовлена несиметрією активно-реактивних елементів навантаження, не вимірюється і не враховується, але завдає електропостачанню істотно більшу шкоду ніж стандартна реактивна потужність. КП в точці підключення неідеального навантаження забезпечує компенсацію одночасно всіх неактивних складових ПП цього навантаження без їх поділу. Компенсація, вимірювання та облік складових ПП пов'язані між собою, доповнюючи одна одну задачу, що з різних економічних позицій вирішують проблему ефективного споживання ЕЕ. Вони повинні вирішуватися в рамках загальної теорії потужності, єдиним комплексним підходом в реальних умовах порушення симетрії напруги.

Отже, розвиток теорії потужності (ТП), методів і засобів компенсації, розробка пропозицій з обліку та оплати неактивних складових ПП, створення оптимальних режимів споживання ЕЕ в електросистемі з несиметричними режимами є актуальною науково-практичною проблемою, яка визначила напрямки досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст дисертаційної роботи складають результати досліджень, які проводились згідно науковому напрямку кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХП». Дисертаційна робота виконувалась згідно завдань держбюджетних тем «Розробка програмних та апаратних засобів моделювання та відображення динамічних об'єктів» (ДР №0113U000436) та «Фізико-технічні основи конструктивно-технологічних рішень плівкових та нанокристалічних сонячних елементів

нової генерації» (ДР №0113U000451), в яких здобувач був одним з основних виконавців.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної проблеми створення узагальненої ТП, єдиного комплексного підходу до компенсації та обліку неактивних складових ПП для забезпечення оптимального режиму споживання ЕЕ в ТПі навантаження до мережі з несиметричною напругою..

Для досягнення мети поставлені задачі:

1. Провести аналіз стану ТП багатофазних систем з несиметричними режимами для обґрунтованого вибору напрямків її подальшого розвитку. Використовуючи методи векторного аналізу, виконати порівняльний аналіз основних підходів до компенсації неактивних складових ПП при несиметричній напрузі.
2. Розробити узагальнену векторну математичну модель (ВММ) 3-фазної схеми електропостачання з несиметричними режимами, в якій аналітична модель 3-провідної схеми забезпечується спеціальним (0-врівноваженим) режимом моделі 4-провідної схеми. Для поглибленого аналізу енергетичних режимів (ЕР) розвинути їх класифікацію, що використовує векторну миттєву потужність (МП).
3. Розробити уточнюючу ВММ синусоїдальних режимів в комплексній формі, що з'ясовує зв'язки між МП і складовими ПП при несиметричній напрузі. Для формування й обґрунтування пропозицій щодо врахування і роздільної оплати ЕЕ неактивних складових ПП розробити методологію розкладання трифазного струму на ортогональні 3-фазні енергетичні компоненти струму (ЕКС), що мають однозначний енергетичний сенс.
4. Розробити методологію та обґрунтувати метод компенсації для створення оптимального врівноваженого режиму (ОВР), який з мінімальними втратами забезпечує поставку ЕЕ без пульсації в синусоїдальному режимі. Для 3-провідної мережі розробити методіку і алгоритм матричного обчислення реактивних провідностей компенсатора неактивного струму, що адекватно працює при несиметричній напрузі.
5. Реалізувати в обчислювальному середовищі пакета Matlab розроблену узагальнену ВММ, яка моделює 3/4-провідну схему поставки, споживання та аналізу в різних класифікованих режимах.
6. Розробити методологію і метод розрахунку додаткових втрат як за вимірюванням комплексних діючих значень (д.з.) струму і напруги в кожній фазі, так і за паспортними даними активно - реактивного навантаження, що підключається.
7. Розробити пропозиції для обліку та оплати ЕЕ, які враховують різний ступінь впливу неактивних складових ПП на якість ЕЕ, стимулюють установку КП, забезпечують надійну політику підвищення якості споживання при несиметричних режимах.

Об'єкт досліджень - електричні 3-фазні процеси в точці приєднання споживача з неідеальним навантаженням до 3- фазної електричної мережі при несиметричній напрузі.

Предмет досліджень - енергетичні параметри і характеристики локальних несиметричних класифікованих режимів, скалярні і векторні потужності електричних процесів (миттєві і усереднені), рівняння потужностей і складові ПП локальних енергетичних режимів, спеціальні ортогональні розкладання 3-фазного струму в класифікованих режимах.

Методи досліджень. Теоретичні методи досліджень засновані на системному підході і використовують методи теорії електричних ланцюгів і лінійної алгебри, векторну алгебру 3-вимірних векторів та її розвиток до векторної алгебри комплексних 3-вимірних векторів (3-комплексів), теорію матриць, методи математичного моделювання та оптимізації, метод ортонормованого базису, який породжує систему координат, відмінну від симетричних складових. Теоретичні методи досліджень підтверджені математичним моделюванням в обчислювальному середовищі пакетів Matlab і MatCad.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі періодичні (як синусоїдальні, так і не синусоїдальні) енергетичні процеси в 3-фазних системах (як 3-провідних, так і 4-провідних) розглянуті з єдиних позицій векторного аналізу. Основою такого підходу став аналітичний метод розкладання тривимірного вектора на дві ортогональні складові: з ноль послідовністю (НПо) і без НПо (0-врівноваженою складовою). Показано як виділити 3-провідну частину 4-провідного ланцюга, еквівалентну початковому ланцюгу, по частині активної МП без 0-складової і частини 0-складової векторної МП, що дозволяє адекватно використовувати отримані для 4-провідних ланцюгів результати в 3-провідних ланцюгах.

Вперше:

1. Запропоновано використати векторну МП для класифікації енергетичних режимів (ЕР) та аналізу додаткових втрат як в 3-провідній, так і 4-провідній 3-фазній системі. Додатково до визначення неврівноваженого режиму введено визначення незбалансованого, збалансованого і реально збалансованого локального ЕР в ТПі навантаження споживача. Висвітлено енергетичний сенс цих режимів.
2. Для синусоїдальних несиметричних режимів встановлено зв'язок між миттєвими потужностями і інтегральними енергетичними характеристиками. Отримані загальні аналітичні вирази для постійної і змінної складової векторної МП, як в 4-провідному, так і 3-провідному 3-фазному ланцюзі в комплексній формі. Це потребувало введення нових (інтегральних) комплексних векторних потужностей: 3-комплексу врівноваженої (непульсуючої) потужності і 3-комплексу потужності небалансу.
3. Показано, що в ТПі несиметричного навантаження споживача до 3-фазної мережі при несиметричній напрузі синусоїдальний режим є і неврівноваженим і незбалансованим. Для ефективного аналізу синусоїдальних 3-вимірних процесів обґрунтовано розширено математичні методи алгебри дійсних 3-вимірних векторів на 3-вимірні комплексні вектори (3-комплекси), що дозволило для кожного режиму отримати рівняння інтегральних потужностей: для неврівноваженого режиму - рівняння потужності пульсацій; для незбалансованого режиму - рівняння потужності втрат.

4. Рівняння потужності втрат представлено як квадратичне розкладання ПП на потужність балансу і потужність небалансу. Показано, що рівняння потужностей незбалансованого режиму визначається відповідними ортогональними компонентами повного струму: струмом балансу і струмом небалансу. Це дає другу (математично еквівалентну) форму рівняння потужності втрат, яка характеризує несиметричний режим з точки зору додаткових втрат (на один Ом). Класифікація режимів уточнена за допомогою еквівалентних провідностей фаз. З'ясовано енергетичний сенс струму балансу. Активний струм ортогонально доповнюється реактивним струмом до струму балансу і забезпечує поставку активної потужності початкового режиму з мінімальними втратами.
5. Відзначено, що в синусоїдальному збалансованому режимі при несиметричній напрузі постійна складова векторної МП характеризується реактивною потужністю, яка обумовлена реактивністю симетричної складової еквівалентних провідностей фаз. Вектор амплітуд змінною складової векторної МП обумовлен несиметрією еквівалентних активно-реактивних провідностей.
6. Показано, що рівняння потужностей незбалансованого режиму не характеризує наявність або відсутність пульсацій в ТПі навантаження споживача. Відома комплексна потужність пульсацій (КПП) квадратично доповнюється новою векторною потужністю (3-комплексом врівноваженої потужності) до ПП і визначає першу форму рівняння потужності пульсацій. Друга форма рівняння потужностей невідновленого режиму визначається відповідними ортогональними компонентами 3-фазного струму: струмом пульсацій і неппульсуючим струмом.
7. При несиметричній напрузі вирішена задача створення оптимального врівноваженого режиму (ОВР), який з мінімальними втратами забезпечує поставку енергії з постійною МП, що дорівнює активній потужності початкового невідновленого і незбалансованого режиму. Методом множників Лагранжа доведено оптимальність створеного режиму. Знайдено аналітичний вираз для струму компенсації та гарантованого коефіцієнту потужності. Запропоновано методику та отримано формули обчислення чисто реактивних провідностей Δ - компенсатора (навантаження типу трикутник) по будь-якому 3-фазному току, активна потужність якого дорівнює нулю.
8. Обґрунтовано підхід цілеспрямованого зниження втрат від несиметричного навантаження, що поєднує вимірювання складових ПП та диференційовану оплату за різними тарифами не тільки активної і реактивної потужності, але і потужності небалансу (несиметрії навантаження) з метою створення економічних важелів для установки КП.

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі полягає у розробці методики розрахунку додаткових втрат, яка дозволяє в незбалансованому режимі роздільно оцінити додаткові втрати: пов'язані як з симетрією реактивних елементів (реактивною потужністю), так і зумовлені несиметрією активних і реактивних елементів (потужністю небалансу) новопідключеного електрообладнання. Запропоновано в практику обліку споживання ЕЕ ввести розрахунки неактивних складових ПМ поточних локальних режимів

електричних мереж по вимірюванням комплексних діючих значень (д.з.) струму і напруги в кожній фазі.

Доведено можливість застосування окремого вимірювання, обліку та оплати ЕЕ складових ПМ за різними тарифами, що стимулює установку КП споживачем і забезпечує постачальнику надійну політику підвищення якості електроенергії в рамках несиметрії навантаження та напруги.

Результати дисертаційної роботи використані:

- ТОВ «ТЕССА» (м. Харків) при розробці «інтелектуального лічильника» електричної енергії;
- ТОВ «Хартеп» (м. Харків) при розробці та впровадженні аналізатора якості електричної енергії;
- навчальному процесі Національного технічного університету «ХПІ» для студентів спеціальностей 05070106 «Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії» при викладанні навчальних курсів «Енергопостачання та електрозбереження» і «Математичні методи енергетики» та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися и обговорювалися на:

- міжнародних науково-технічних конференціях «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств» (Маріуполь, 2008), «Проблеми сучасної електротехніки –2012» (Вінниця, 2012), «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем» (Донецьк, 2013);
- міжнародних науково-практичних конференціях «Електрохозяйство потребителей в новых условиях функционирования энергетики» (Москва, 2008), «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений», (Москва, 2009), «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», (Харків, 2013);
- міжнародному симпозиуму «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів, теорія і практика, SIEMA'2012», (Харків, 2012);
- міжнародних семінарах (conference–seminar «International School On Nonsinusoidal Currents and Compensation» (Польща, Łagów, 2008, 2010), «Силовая та біомедична електроніка» наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (Харків, каф. ПБМЕ НТУ «ХПІ», 2014).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 28 наукових публікаціях, зокрема: 17 статей у наукових фахових виданнях України (5 – у наукометричних базах), 8- у іноземних періодичних фахових виданнях, та 3 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 336 сторінок; з них 46 рисунків по тексту; 9 рисунків на 6 окремих сторінках; 11 таблиць по тексту; 10 таблиць на окремих 9 сторінках;

списку використаних джерел з 225 найменувань на 22 сторінках, 3 додатків на 33 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведена загальна її характеристика.

У першому розділі проведено аналіз теорії потужності для багатофазних систем в синусоїдальному і несинусоїдальному режимі з метою її подальшого розвитку при несиметричній напрузі в рамках єдиного комплексного підходу до компенсації та обліку неактивних складових ПП. Зростаючий теоретичний і практичний інтерес до визначень і інтерпретацій понять реактивної потужності (неактивних складових ПП), пошуки фізичного сенсу, неоднозначність визначення повної (удаваній) потужності в багатофазних системах, складність задачі привели до створення різних «шкіл» ТП і методів компенсації неактивних складових ПП. Для несинусоїдальних процесів два альтернативних методи дослідження енергетичних процесів (ЕП) та аналізу понять ТП використовують: спектральний (*Budeanu, Quade, Пухов, Emanuel, Czarneski, Шкловский, Кузнецов, Ferero* та *Superti-Furga, Lev-Ari* та *Stankovi'c* та інші) і часовий (*Buchholz, Fryze, Depenbrock, Демирчан, Маевский, Nabae* та *Akagi, Willems, Watanabe* та *Aredes, Tolber, Salmeron* та *Montano, Тонкаль* та *Новосельцев* та інші).

У дисертаційній роботі подальший розвиток отримав часовий метод аналізу. Часовий метод аналізу базується на спеціальному розкладі 3- фазного струму на ортогональні складові. Одна з компонент такого спеціального розкладу визначає *активний струм*, який після компенсації залишається в ланцюгу джерела і забезпечує поставку ЕЕ активної потужності. Використовуються два підходи до розгляду 3- фазних процесів, в яких визначення активного струму різні. Перший підхід розглядає 3-фазні процеси на інтервалі усереднення. Підхід використовує інтегральні характеристики процесів і пов'язаний з узагальненням на багатофазні процеси методу *Fryze*. Другий підхід заснований на миттєвих енергетичних характеристиках: активної (скалярної) МП та реактивної (векторної) МП. Підхід привів до розробки так званих активних фільтрів. Теорії миттєвих потужностей розрізняються вибором системи координат для 3-фазових величин. Для 3-провідних систем поняття реактивної МП вводиться за допомогою $\alpha\beta$ координат, а підхід відомий як «*pq*-теорія» (*Nabae* та *Akagi*). Для 4-провідного ланцюга модифікована «*pq*-теорія» (*Akagi, Watanabe* та *Aredes*) застосуванням $\alpha\beta 0$ координат дає розкладання струму, яке дозволяє компенсувати струм нульової послідовності тільки при наявності зміщення нуля 3-фазної напруги.

Крос-векторна теорія МП (*Peng* та *Lai*) інваріантна до вибору системи координат, тому що для визначення реактивної МП використовує визначення векторного добутку. Крос-векторна теорія, *pqr* теорія (*Kim, Akagi*) не дозволяють компенсувати струм НПо (активний струм містить НПо), якщо напруга несиметрична. Метод *Willems'* визначає миттєвий активний (і неактивний)

струм для будь-якого числа фаз, інваріантний до вибору системи координат, і не вимагає поняття векторної потужності. Методи *Willems* та *Fryze* не компенсують струм НПо, якщо напруга має зміщення нуля.

В FBD методиці (*Fryze-Buchholz-Depenbrock*) зроблена спроба об'єднати ці два підходи. Однак питання (*Czarnecki*): «Як пара МП: активної p і реактивної q в синусоїдальному несиметричному режимі пов'язана з відомими трьома інтегральними потужностями: активною (середньою) потужністю, реактивною потужністю і потужністю несиметрії навантаження?» залишилося відкритим. Так, для 3-провідної системи з синусоїдальними процесами при симетричній напрузі середня величина реактивної миттєвої потужності дорівнює реактивній потужності синусоїдального режиму, але з протилежним знаком

В синусоїдальному режимі *потужність пульсацій* і *потужність несиметрії* (ПН) навантаження - неактивні складові ПП. Вони співпадають тільки в окремому випадку 3-провідної схеми електропостачання при симетричній напрузі, коли несиметрія навантаження є єдиною причиною пульсації МП. У загальному випадку потужність пульсацій і ПН – різні характеристики енергетичних несиметричних режимів (*Кузнецов*). При цьому в 3-провідній схемі не кожне несиметричне активно-реактивне навантаження приводить до додаткових втрат (схема *Steinmetz*). Це вимагає створення ТП, яка дозволяє розрізняти ці особливості 3/4-провідної схеми для обліку неактивних складових ПП. Потужність пульсацій – неактивна складова ПП, і подальший розвиток ТП, створення оптимальних режимів вимагає знання рівняння потужностей, в яке входить потужність пульсацій. Виявлені недоліки існуючих ТП, необхідність загального уявлення ЕП в 3/4 провідних схемах електропостачання визначили напрямки подальшого розвитку та удосконалення ТП і методів компенсації для несиметричних режимів в рамках єдиної математичної моделі.

У **другому розділі** розробляється узагальнена ВММ в 3-фазній 4- провідній схемі електропостачання (рис. 1). Векторні процеси 3-фазних струмів і напруг

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [u_a(t) \ u_b(t) \ u_c(t)]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T. \quad (2)$$

характеризуються парою миттєвих енергетичних характеристик: скалярною і векторною МП:

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{u}, \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{i} \times \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \underbrace{i_b u_c - i_c u_b}_{q_a} & \underbrace{i_c u_a - i_a u_c}_{q_b} & \underbrace{i_a u_b - i_b u_a}_{q_c} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Визначник Грама

$$\begin{vmatrix} \dot{\mathbf{i}} \cdot \dot{\mathbf{i}} & \dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{u} & \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \end{vmatrix} \equiv \underbrace{[\dot{\mathbf{i}} \times \mathbf{u}]^T}_{q(t)} \underbrace{[\dot{\mathbf{i}} \times \mathbf{u}]}_{q(t)} \equiv \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} = q^2 \quad (5)$$

пов'язує МП (3-4) і вводить *рівняння* МП у кожному мить часу

$$(\dot{\mathbf{i}} \cdot \dot{\mathbf{i}})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) \equiv (\dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{u})(\dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{u}) + [\dot{\mathbf{i}} \times \mathbf{u}]^T [\dot{\mathbf{i}} \times \mathbf{u}] \Rightarrow s^2(t) \equiv p^2(t) + q^2(t). \quad (6)$$

Тут і далі $s^2(t) = i^2(t) \cdot u^2(t) = \dot{i} \cdot \dot{i} \cdot \dot{u} \cdot \dot{u}$ – квадрат повної МП.

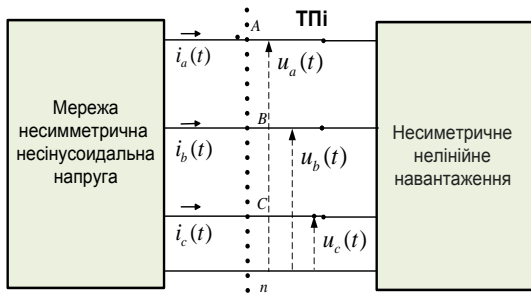


Рисунок 1 – Векторні процеси 3-фазних струмів і напруг в точці підключення навантаження

Розкладання (6) інваріантне щодо перестановки векторів \dot{i} та \dot{u} . Однак $\dot{i} \times \dot{u} = -\dot{u} \times \dot{i}$. У дисертаційній роботі векторна МП визначається як векторний добуток (4) векторів миттєвих значень (м.з.) фазних струмів і напруг. Таке визначення векторної МП (4) має знак протилежний векторній МП в так званих « pq – теоріях» і введено так, щоб обґрунтовано зв'язати характеристики теорії МП з інтегральними потужностями. Якщо скалярна МП (3)

дорівнює швидкості потоку ЕЕ, то векторна МП (4) характеризує поставку і споживання ЕЕ з точки зору додаткових втрат. Коли вектора (1-2) паралельні, скалярна МП дорівнює повній МП ($\mathbf{u} \parallel \mathbf{i} \Leftrightarrow |s| = |\mathbf{u}| \cdot |\mathbf{i}| = p$).

Тому норма векторного добутку (4) інтерпретується як *неактивна* МП. Для класифікації локальних енергетичних режимів в ТПі навантаження запропоновано використовувати не тільки скалярну МП (для визначення врівноважений /неврівноважений режим), але і векторну МП $\mathbf{q}(t) = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}(t)$.

Режим *незбалансований*, якщо змінна складова векторної МП не дорівнює нулю ($\tilde{\mathbf{q}}(t) \neq 0$). Коли векторна МП постійна $\mathbf{q}(t) \equiv \bar{\mathbf{q}} \neq 0$ ($\tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0$), то режим *збалансований*. Режим *реально збалансований*, якщо векторна МП тотожно дорівнює нулю $\mathbf{q}(t) \equiv 0 \Leftrightarrow (\bar{\mathbf{q}} \equiv 0 \& \tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0)$.

Основу *узагальненої* ВММ опису та аналізу ЕП в 3/4-провідній схемі складає ортогональний розклад

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{x}_1 = \underbrace{(\mathbf{x} \cdot \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0}_{\mathbf{x}_0} + \underbrace{\mathbf{e}_0 \times [\mathbf{x} \times \mathbf{e}_0]}_{\mathbf{x}_1} \quad (7)$$

довільного 3-вектора $\mathbf{x} = [x_a \ x_b \ x_c]^T$ вздовж орта 0-послідовності (НПо)

$$\mathbf{e}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \ 1 \ 1]^T, \quad (|\mathbf{e}_0| = 1). \quad (8)$$

Представлення векторного множення на орт НПо ліворуч і праворуч

$$\mathbf{e}_0 \times \mathbf{x} = \mathbf{K} \mathbf{x}, \quad \mathbf{y} \times \mathbf{e}_0 = \mathbf{K}^* \mathbf{y} \quad (9)$$

кососиметричною матрицею

$$\mathbf{K} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\mathbf{K}^* = -\mathbf{K}) \quad (10)$$

визначає другу складову розкладання (7)

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{e}_0 \times [\mathbf{x} \times \mathbf{e}_0] = \mathbf{D}_1 \mathbf{x} \quad (11)$$

в матричній формі. Матриця

$$D_1 = K \cdot K = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

визначає проектор ($D_1^2 = D_1$) на 2-вимірний підпростір 0-рівноважених 3-вимірних векторів

$$L_1^{(2)} = \{x \in \mathbb{R}^{(3)} : x = D_1 x\}, \quad (L_1^{(2)} \subset \mathbb{R}^{(3)}), \quad (13)$$

які ортогональні орту (8). Для процесів струму і напруги (рис. 2) розкладання (7) виконується тотожно

$$i(t) \equiv i_0(t) + i_1(t), \quad u(t) \equiv u_0(t) + u_1(t). \quad (14)$$

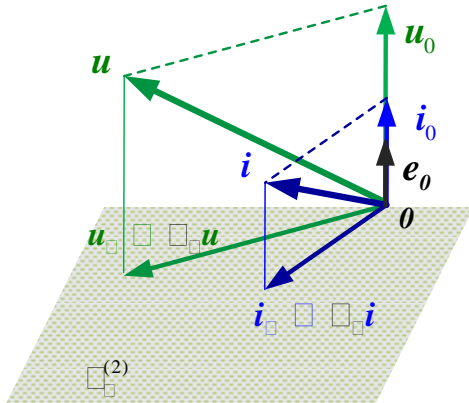


Рисунок 2 – Виділення 0-урівноважених векторів струму і напруги.

Запропоновано структурну схему (рис. 3) розподілу струму 4-провідної схеми на два ортогональних 3-х фазних ЕП: а) одновимірний 3-х фазного процесу з однаковими струмами в фазних проводах (які дорівнюють середньому струму 3-х фазних струмів первісної 4-провідної схеми) і, отже, таким же струмом у нейтралі, що і у первісній схемі; б.) 2-вимірним процесом 3-х фазного струму $i_1(t)$, який не містить 0-складову струму.

Розділені процеси характеризуються скалярною і векторною МП:

0 – схема:

$$p_0 = i_0 \cdot u = i_0 u_0, \quad q' = i_0 \times u_1; \quad (15)$$

– схема:

$$p_1 = i_1 \cdot u = i_1 \cdot u_1, \quad q'' = i_1 \times u_1. \quad (16)$$

У # – схемі однозначність вибору точки відліку (ТВ) напруги u забезпечується процедурою $u_1 = D_1 u$. Процеси # – схеми 0-урівноважені ($i = i_1$, $u = u_1$) та їх векторна МП $q'' = i_1 \times u_1 = q_0 e_0 = q_0$ характеризується повністю скаляром – змішаним добутком трьох векторів $q_0 = [i \times u] \cdot e_0 = [iue_0]$ та обчислюється як

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_a(u_b - u_c) + i_b(u_c - u_a) + i_c(u_a - u_b)]. \quad (17)$$

Запропоноване структурне виділення 2-вимірних 0-урівноважених процесів дозволяє однозначно виділити 3-провідну схему з 0-урівноваженими ЕП (струму і напруги) і вважати 3-провідну схему окремим випадком 4-провідної схеми.

Компенсатор (рис. 4) нуля послідовності струму (0-КП) дозволяє усунути струм нульового проводу і зменшити навантаження на нейтраль всієї мережі.

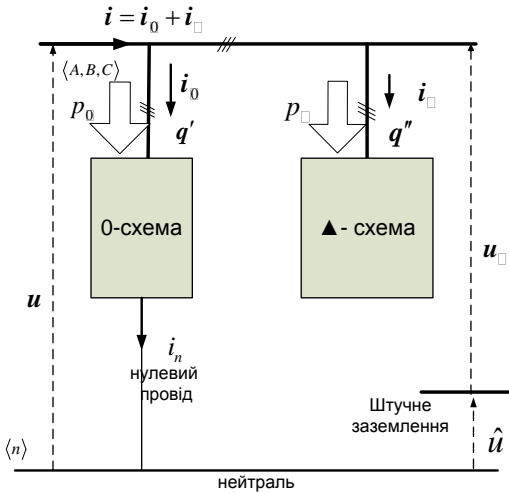


Рисунок 3 – Структурна схема 0-розділення процесів.

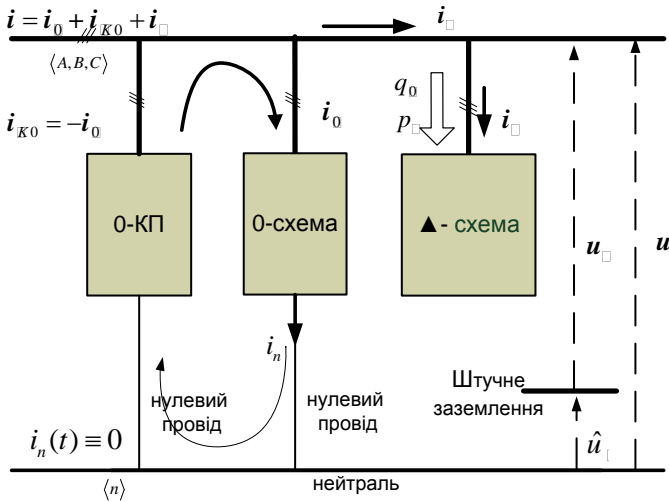


Рисунок 4 – Приєднання компенсатора нуля послідовності струму

$$w_1(t) = w_1 = \frac{D_1 u}{|D_1 u|} = \frac{u_1}{|u_1|},$$

Аналіз 0-врівноважених режимів виконано запровадженням ортонормованого базису векторів на площині $L_1^{(2)}$. Запропоновано метод однозначної побудови пари взаємно ортогональних ортів на площині (13) за довільним 3-вектором. Метод використовує введені матриці (10), (12). Зокрема, для вектора напруг трьох фаз u , що вимірюється відносно довільної ТВ, метод дозволяє ввести орти фазних і міжфазних напруг (які 0- врівноважені і ортогональні):

$$w_{n_2}(t)_2 = w_{n_2} = \frac{K' u}{|K' u|} = \frac{u_n}{|u_n|}. \quad (18)$$

Орти (18) визначають базис на площині (13) і дають розкладання 0-врівноваженого струму в 3-провідному ланцюгу. Спільно з ортом (8) орти (18) дають ортонормований базис 3-вимірного простору \square^3 і визначають розкладання струму в 4-провідному ланцюгу (рис. 5)

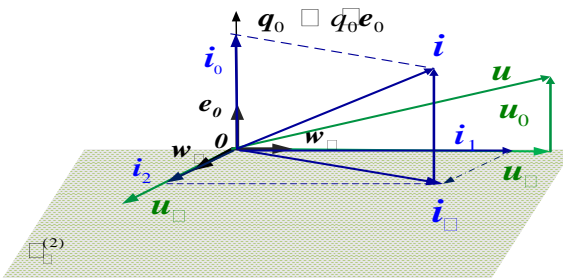


Рисунок 5 – Ортогональний базис і розкладання струму в 4-провідній схемі.

$q'' = q_0 = q_0 e_0$ з вектором u_n міжфазних напруг ($|u_1| = |u_n|$); 3) компоненту векторної МП $q' = i_0 \times u_1$ з струмом нуля послідовності ($|i_0| = |q'| / |u_1|$). Так як $q = q' + q''$, то компенсація компонент струмів i_2, i_0 робить режим реально збалансованим ($q \equiv 0$), однак залишає його неврівноваженим. Додаткова компенсація \tilde{p}_1 робить режим врівноваженим, але вимагає затримки по часу для оцінки середньої потужності. P_1 . Реалізована програма узагальненої ВММ в середовищі візуального програмування Simulink пакету Matlab (рис.6), яка дозволяє моделювати енергетичні процеси несиметричних режимів, миттєві потужності, всі компоненти розкладання струму (19), процес і результати компенсації (рис. 7, 8).

$$i(t) = i_1 w_1 + i_2 w_n + i_0 e_0 = i_1 + i_2 + i_0. \quad (19)$$

Коефіцієнти розкладання (19) :

$$i_1 = i \cdot w_1 = \frac{i \cdot u_1}{|u_1|} = \frac{p_1}{|u_1|}, \quad (20)$$

$$i_2 = i \cdot w_n = \frac{i \cdot u_n}{|u_n|} = \frac{(i \times u) \cdot e_0}{|u_n|} = \frac{q_0}{|u_n|}, \quad (21)$$

$$i_0(t) = i \cdot e_0 \quad (22)$$

пов'язують: 1) МП $p_1 = P_1 + \tilde{p}_1$ з вектором 0-врівноважених фазних напруг u_1 ; 2) компоненту векторної МП

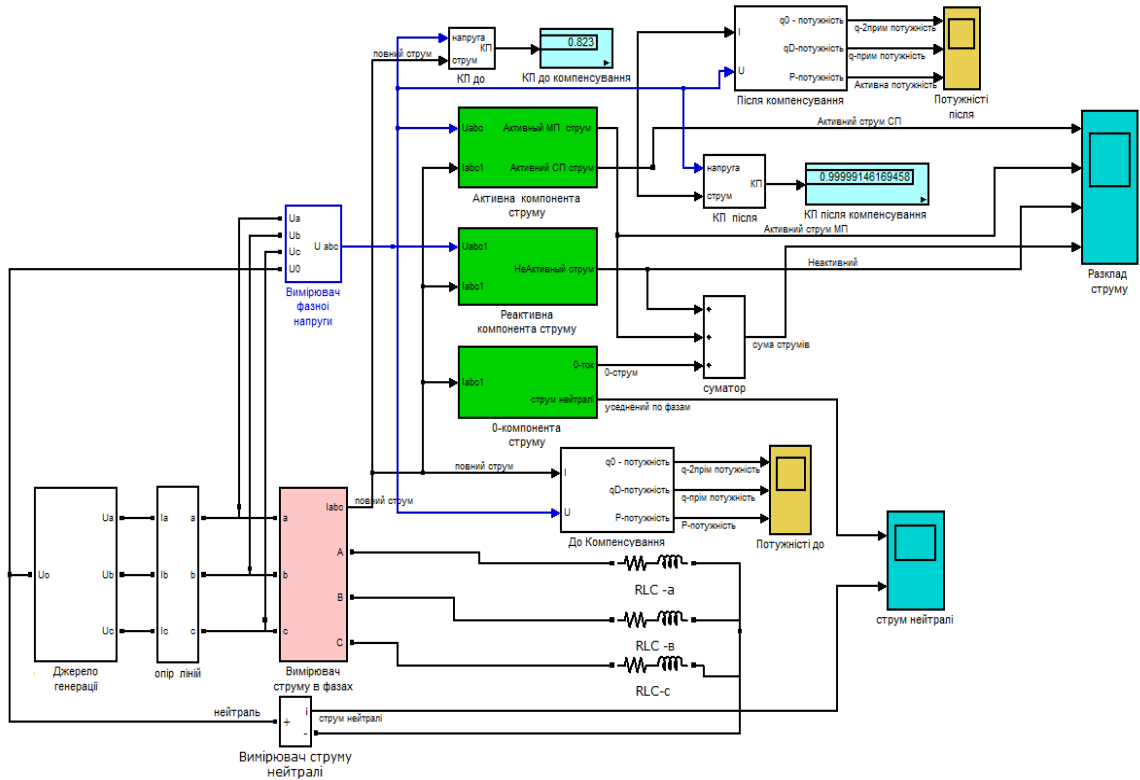


Рисунок 6 – Програмна реалізація узагальненої математичної моделі ЕР для 3-фазної схеми постачки

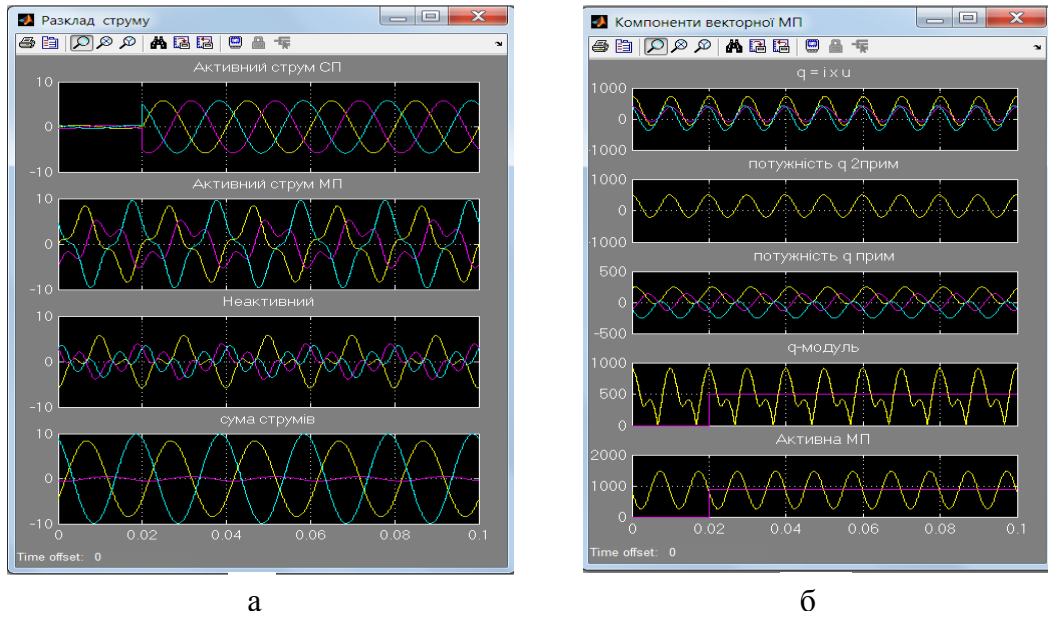


Рисунок 7 – Осцилограми розкладання:

(а) повного 3-фазного струму на компоненти; Зверху/вниз: панель 1– активний струм по середній потужності; 2– активний струм по МП; 3– неактивний струм; 4– повний струм;

(б) векторної і скалярної ММ на складові; Зверху/вниз: панель 1 – векторна ММ; 2– q_0 – потужність 0-врівноваженого струму; 3– векторна МП струму 0П; 4– q модуль векторної МП і її постійна складова; 5 – p – активна МП та її постійна складова .

Зокрема, активний струм в джерелі $i_s = (P_1 / u_1^2) u_1$ забезпечує реально збалансований, врівноважений режим (рис. 8.б) з нульовим струмом в нейтралі.

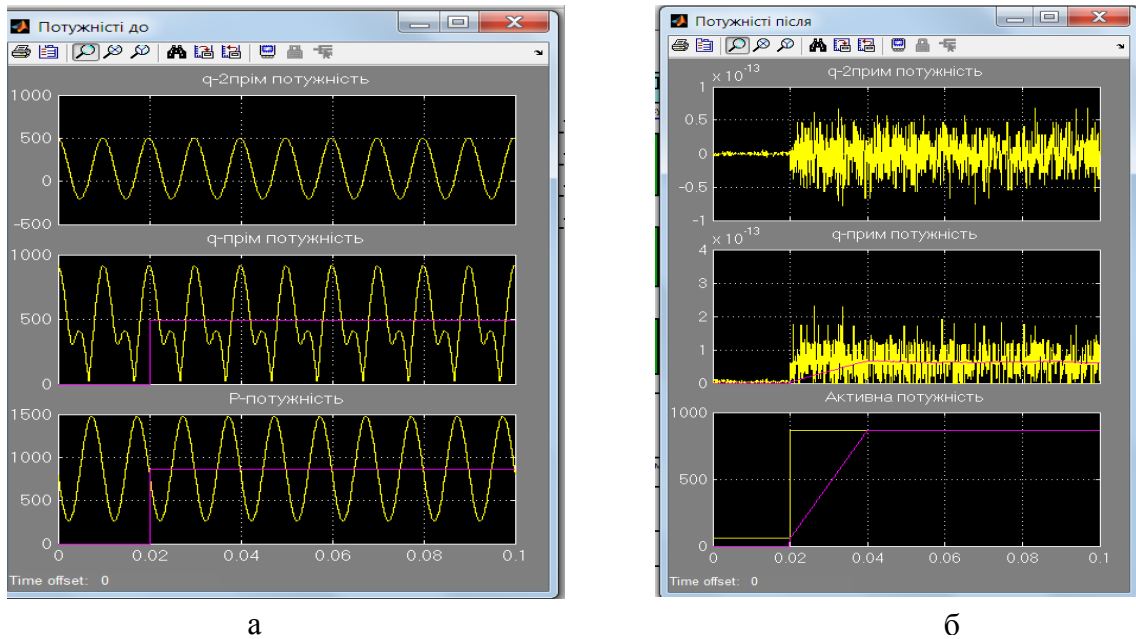


Рисунок 8 - Осцилограми скалярної МП і складові векторної МП; (а) – до компенсації і (б) – після компенсації. Зверху/вниз: панель 1–компонента векторної МП струму НПі; панель 2–q₀ - потужність 0-врівноваженого струму; панель 3-активна потужність.

У третьому розділі розробляється *уточнююча* ВММ синусоїдальних несиметричних режимів 3-фазної 4-провідної схеми електропостачання. Модель використовує представлення 3-кривих м.з. синусоїдальних процесів струму і напруги в 3-фазному ланцюзі в комплексній формі (3-комплексами):

$$u(t) = \sqrt{2} \Re[Ue^{j\omega t}], \quad i(t) = \sqrt{2} \Re[Ie^{j\omega t}]. \quad (23)$$

Норми 3-вимірних векторів комплексних д.з. $U = [\dot{U}_a \ \dot{U}_b \ \dot{U}_c]^T$, $I = [\dot{I}_a \ \dot{I}_b \ \dot{I}_c]^T$ и д.з. 3-кривих співпадають $\|u\| = |U| = U$, $\|i\| = |I| = I$.

Показано, що звичайна миттєва потужність

$$p(t) = P + \tilde{p}(t) = \Re[\underbrace{U^*}_{\dot{S}} \underbrace{I}_{\dot{N}} + \underbrace{I^*}_{\dot{N}} \underbrace{U}_{\dot{S}} e^{j2\omega t}] \quad (24)$$

визначена двома комплексними потужностями синусоїдального режиму (СР):

- комплексною геометричною потужністю (КГП),

$$\dot{S} = \dot{U}_a I_a^* + \dot{U}_b I_b^* + \dot{U}_c I_c^* = U^* I^* = P + jQ; \quad (25)$$

- комплексною потужністю пульсацій (КПП)

$$\dot{N} = \dot{U}_a \dot{I}_a + \dot{U}_b \dot{I}_b + \dot{U}_c \dot{I}_c = I^* U = Ne^{j \arg \dot{N}}. \quad (26)$$

Тут і далі *–знак комплексного спряження (КС); $P = \Re \dot{S} = \bar{p}$ – активна (середня) потужність; $Q = \Im m \dot{S}$ – реактивна потужність синусоїдального режиму (СР). У просторі 3-вимірних комплексних векторів (яке позначене \square^3) КГП – дорівнює комплексному скалярному добутку 3-комплекса напруги на 3-

комплекс струму, а КПП дорівнює комплексному скалярному добутку 3-комплексу струму і КС 3-комплексу напруги $\mathbf{U}^* = [U_a^* \ U_b^* \ U_c^*]^T$:

$$\dot{S} = P + jQ = \mathbf{U}^* \mathbf{I}^* = (\mathbf{U}, \mathbf{I}), \quad \dot{N} = Ne^{j \arg \dot{N}} = \mathbf{I}^* \mathbf{U} = \mathbf{I}^* (\mathbf{U}^*)^* = (\mathbf{I}, \mathbf{U}^*). \quad (26)$$

Показано, що в синусоїдальному режимі векторна МП представлена як

$$\mathbf{q} = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}(t) = \underbrace{\Re[\mathbf{K}]}_{\bar{\mathbf{q}}} + \underbrace{\Re[\mathbf{D}e^{j2\omega t}]}_{\tilde{\mathbf{q}}(t)} \quad (27)$$

і визначена двома новими векторними комплексними потужностями:

$$\mathbf{D} = \mathbf{I} \times \mathbf{U} = [\dot{i}_b \dot{U}_c - \dot{i}_c \dot{U}_b \quad \dot{i}_c \dot{U}_a - \dot{i}_a \dot{U}_c \quad \dot{i}_a \dot{U}_b - \dot{i}_b \dot{U}_a]^T = [\dot{D}_a \quad \dot{D}_b \quad \dot{D}_c]^T \quad (28)$$

- 3- комплексом *потужності небалансу* (ПН) ;

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* = [\dot{i}_b U_c^* - \dot{i}_c U_b^* \quad \dot{i}_c U_a^* - \dot{i}_a U_c^* \quad \dot{i}_a U_b^* - \dot{i}_b U_a^*]^T = [\dot{K}_a \quad \dot{K}_b \quad \dot{K}_c]^T \quad (29)$$

- 3-комплексом *непульсуючої потужності* (НП).

В *уточнюючій* ВММ класифікація локальних режимів уточнюється в термінах еквівалентних провідностей фаз

$$\dot{Y}_k = \dot{I}_k / \dot{U}_k \quad (k \in \{a, b, c\}). \quad (30)$$

З (27) випливає, що синусоїдальний режим збалансований ($\tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0$), якщо 3-комплекс потужності небалансу (28) (або його норма $D = |\mathbf{D}|$) дорівнює нулю або еквівалентні провідності фаз однакові ($\dot{Y}_a = \dot{Y}_b = \dot{Y}_c = \dot{Y}_e$):

$$\tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0 \Leftrightarrow \mathbf{D} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{I} = \dot{Y}_e \mathbf{U}; \quad (\dot{Y}_e = G_e + jB_e). \quad (31)$$

Тут $\dot{Y}_e = (\mathbf{I}^* \mathbf{U}^*) / |\mathbf{U}|^2$ - еквівалентна провідність збалансованого режиму.

У цьому режимі повна потужність дорівнює модулю геометричної потужності (25), що для *коефіцієнта потужності* дає:

$$S_B = \underbrace{|\mathbf{I} \parallel \mathbf{U}|}_{\text{повна потужність}} = \underbrace{\sqrt{P^2 + Q^2}}_{\text{модуль геометричної потужності}}, \quad \lambda = P/S_B = P/\sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (32)$$

Доведено, що постійна складова векторної МП пов'язана з реактивною потужністю

$$\bar{\mathbf{q}} = \Re \mathbf{K} = Q \cdot \Im[\boldsymbol{\eta}], \quad (33)$$

де $\boldsymbol{\eta} = [\mathbf{U} \times \mathbf{U}^*] / |\mathbf{U}|^2$ - 3-комплекс, що характеризує несиметрію напруги (якщо напруга симетрична, то $\boldsymbol{\eta} = j\mathbf{e}_0$ і $\bar{\mathbf{q}} = Q \cdot \mathbf{e}_0$, при цьому $|\bar{\mathbf{q}}| = |Q|$).

Синусоїдальний *режим реально збалансований*, якщо виконується одне з рівносильних тверджень: потужність небалансу і реактивна потужність дорівнюють нулю, еквівалентні провідності фаз однакові і дійсні

$$\mathbf{q}(t) \equiv 0 \Leftrightarrow (\mathbf{D} = 0) \& (Q = 0) \Leftrightarrow \mathbf{I} = G_e \mathbf{U}. \quad (34)$$

При цьому $S_B = P$ та коефіцієнт потужності $\lambda = 1$.

Синусоїдальний *режим незбалансований*, якщо виконується одне з рівносильних тверджень: 3-комплекс потужності небалансу (28) відмінний від нуля; 3-комплекси струму і напруги не колінеарні; еквівалентні провідності фаз різні

$$(\mathbf{D} \neq 0 \Leftrightarrow \mathbf{U} \not\parallel \mathbf{I}) \Leftrightarrow \dot{Y}_a \neq \dot{Y}_b \neq \dot{Y}_c. \quad (35)$$

Для *незбалансованого* режиму ($\tilde{q}(t) \neq 0$) отримано рівняння інтегральних потужностей:

$$\underbrace{|I|^2}_{S_B^2} |U|^2 = \underbrace{\dot{S}}_{P^2+Q^2} S^* + \underbrace{D \cdot D^*}_{D^2}, \quad (S_B^2 = P^2 + Q^2 + D^2). \quad (36)$$

Для незбалансованого режиму справедливо ортогональне розкладання 3-фазного струму на *енергетичні компоненти струму* (ЕКТ)

$$\mathbf{i}(t) = \underbrace{\mathbf{i}_a(t)}_{i_a(t)} + \underbrace{\mathbf{i}_r(t)}_{i_r(t)} + \mathbf{i}_u(t) \Leftrightarrow \mathbf{I} = \underbrace{\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_r}_{\mathbf{I}_b} + \mathbf{I}_u, \quad (37)$$

Тут і далі: активний, реактивний струм і струм небалансу :

$$\mathbf{i}_a(t) \equiv \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_a e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{aF} = (P/U^2) \mathbf{U}; \quad (38)$$

$$\mathbf{i}_r(t) \equiv \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_r e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_r = -j(Q/U^2) \mathbf{U}; \quad (39)$$

$$\mathbf{i}_u(t) \equiv \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_u e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_u = [\mathbf{U}^* \times \mathbf{D}] / |U|^2. \quad (40)$$

Сума активного і реактивного струму визначає струм балансу

$$\mathbf{i}_b(t) \equiv \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_b e^{j\omega t}] \quad (\mathbf{I}_b = (S^*/U^2) \mathbf{U}), \quad (41)$$

який обумовлений симетрією еквівалентних провідностей фаз – провідністю струму балансу

$$S^*/|U|^2 = \sum_{k \in \{a,b,c\}} \dot{Y}_k |U_k|^2 / |U|^2 = G_S + jB_S = \dot{Y}_S. \quad (42)$$

Струм небалансу (40) обумовлений несиметрією еквівалентних провідностей і характеризується 3-комплексом потужності небалансу (28). Справедливо квадратичне розкладання повного струму

$$|\mathbf{I}|^2 = |\mathbf{I}_a|^2 + \underbrace{|\mathbf{I}_r|^2 + |\mathbf{I}_u|^2}_{\text{додаткові втрати}} \Leftrightarrow \|\mathbf{i}(t)\|^2 = \|\mathbf{i}_a(t)\|^2 + \underbrace{\|\mathbf{i}_r(t)\|^2 + \|\mathbf{i}_u(t)\|^2}_{\text{додаткові втрати}}. \quad (43)$$

Доведений зв'язок між нормами 3-комплексів:

$$S_G = |\dot{S}| = |\mathbf{I}_b| |U|, \quad D = |\mathbf{D}| = |\mathbf{I}_u| |U| \quad (44)$$

забезпечує еквівалентність квадратичного розкладання квадрату повного струму (43) і деталізованого рівняння потужностей незбалансованого режиму

$$|\mathbf{I}|^2 = |\mathbf{I}_{aF}|^2 + \underbrace{|\mathbf{I}_r|^2 + |\mathbf{I}_u|^2}_{\text{додаткові втрати}} \Leftrightarrow S_B^2 = P^2 + \underbrace{Q^2 + D^2}_{\text{додаткові втрати}} \quad (45)$$

і визначає *енергетичний зміст* рівняння потужностей незбалансованого режиму. Коефіцієнт потужності в незбалансованому режимі обчислюється як

$$\lambda = P/S_B = P/\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}. \quad (46)$$

Отримано квадратичне розкладання повної потужності для оцінки ступеню невірноваженості режиму

$$\underbrace{|\mathbf{I}|^2}_{S_B^2} / |U|^2 = \underbrace{\dot{N}}_{N^2} N^* + \underbrace{\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^*}_{K^2}, \quad S_B^2 = N^2 + K^2. \quad (47)$$

У рівнянні потужностей (47) невірноваженого режиму ($\dot{N} \neq 0$) скалярний квадрат вектора (29) непульсуючої потужності $K^2 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^*$ квадратично доповнює квадрат модуля $N^2 = \dot{N} N^*$ комплексної потужності пульсацій (26). Показано, що рівняння потужностей (47) невірноваженого режиму еквівалентно

ортогональному ($\mathbf{I}_p \mathbf{I}_n^* = \mathbf{I}_n \mathbf{I}_p^* = 0$) розкладанню повного струму і його 3-комплексу

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_p(t) + \mathbf{i}_n(t) \Leftrightarrow \mathbf{I} = \mathbf{I}_p + \mathbf{I}_n \quad (48)$$

на дві складові: пульсуючий струм і врівноважений (непульсуючий) струм.

$$\mathbf{i}_p(t) = \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_p e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_p = (\dot{N}/U^2) \mathbf{U}^*; \quad (49)$$

$$\mathbf{i}_n(t) = \sqrt{2} \Re[\mathbf{I}_n e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_n = [\mathbf{U} \times \mathbf{K}] / |\mathbf{U}|^2. \quad (50)$$

Показано, що струм пульсацій має мінімальне д.з. серед усіх струмів, які при заданій напрузі мають таку ж потужність пульсацій, що і повний струм. Режим може бути одночасно і незбалансованим і невірноваженим.

Таким чином, для 4-провідної схеми електропостачання з синусоїдальним несиметричним режимом отримані загальні аналітичні вирази для постійної і змінної складової векторної МП (27) в комплексній формі, що встановлюють аналітичний зв'язок між характеристиками теорії МП і інтегральними енергетичними характеристиками і вводять нові інтегральні комплексні векторні потужності: 3-комплекс неппульсуючої потужності (29) і 3-комплекс потужності небалансу (28). У термінах еквівалентних провідностей фаз уточнена класифікація режимів (31), (34), (35). Показано, що чотири комплексні (скалярні (24), (25) і векторні (28), (29)) потужності формують два дуальних рівняння потужностей (36) і (47). Для кожного рівняння (36) і (47) отримано ортогональне розкладання 3-фазного струму (37) і (48) на компоненти з однозначним енергетичним змістом. Це дозволяє обґрунтовано використовувати розкладання (37) для вимірювання та обліку складових ПП.

У четвертому розділі розробляється спеціальна ВММ несиметричних синусоїдальним режимів для 3-провідної схеми енергопостачання шляхом аналітичного уточнення та спрощення моделі, отриманої для 4-провідної схеми. Неоднозначність вибору ТО напруги знімається використанням матриці – проектора (12), що забезпечує адекватне уявлення вектора 3-фазних напруг 0-врівноваженим 3-комплексом напруги $\mathbf{U}_1 = \mathbf{D}_1 \mathbf{U}$.

Синусоїдальні процеси в три провідному ланцюгу представляються 0-врівноваженими 3-комплексними, які формують 2-вимірний комплексний підпростір $\mathbf{H}_1^{(2)} = \{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^3 : \mathbf{D}_1 \mathbf{X} = \mathbf{X}\}$, що ортогональний орту НПо. Це забезпечує коректне застосування поняття еквівалентних провідностей фаз (30) при несиметричній напрузі..

У 3-провідному ланцюзі 3-комплекси потужності небалансу (28) і неппульсуючої потужності (29) містять тільки 0-послідовність (рис.9) і повністю визначені скалярними комплексними потужностями (комплексами): комплексної потужності небалансу (КПН) і

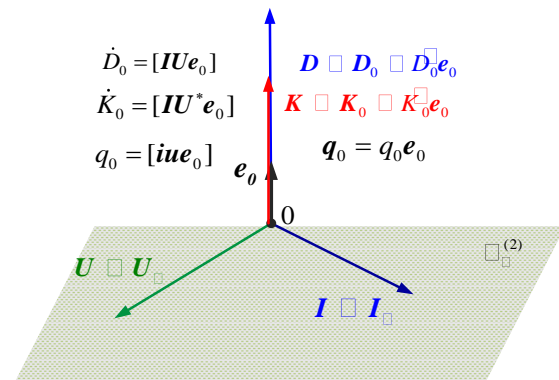


Рисунок 9 – 3-комплекси струму, напруги, потужності небалансу і неппульсуючої потужності для 3-провідного ланцюга

комплексної непульсуючою потужністю (КНП), які обчислюються як змішані добутки комплексних векторів:

$$\dot{D}_0 = [I U e_0] = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (\dot{U}_b - \dot{U}_c) + \dot{I}_b (\dot{U}_c - \dot{U}_a) + \dot{I}_c (\dot{U}_a - \dot{U}_b)], \quad (51)$$

$$\dot{K}_0 = [I U^* e_0] = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (U_b^* - U_c^*) + \dot{I}_b (U_c^* - U_a^*) + \dot{I}_c (U_a^* - U_b^*)]. \quad (52)$$

Для 3-провідного ланцюга активна потужність 0-послідовності дорівнює 0 і рівняння потужностей (36) і (47) записуються як:

$$S_B^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D_0^2, \quad S_B^2 = N_1^2 + K_0^2. \quad (53)$$

Тут потужності

$$S_B = |U_1| |I_1|, \quad \dot{S}_1 = U_1^* I_1 = P_1 + jQ_1, \quad \dot{N}_1 = I_1^* U_1 \quad (54)$$

обчислені при умові, що процеси струму і напруги 0-врівноважені:

$$I = I_1 = D_1 I, \quad U = U_1 = D_1 U. \quad (55)$$

У синусоїдальному режимі активна і реактивна миттєві потужності (16)

$$p_1 = \underbrace{\Re[\dot{S}_1]}_{P_1} + \underbrace{\Re[\dot{N}_1 e^{j2\omega t}]}_{\dot{p}_1}, \quad q_0(t) = \underbrace{\Re[\dot{K}_0]}_{\dot{q}_0} + \underbrace{\Re[\dot{D}_0 e^{j2\omega t}]}_{\dot{q}_0(t)} \quad (56)$$

визначені комплексами (51), (52) і (54). Для аналізу синусоїдальних ЕР використаний метод ортонормованого базису. Досліджено три ортонормованих базиса 2-вимірного комплексного підпростору $H_1^{(2)}$: а.) симетричних складових; б.) базис незбалансованого режиму; в.) базис неуврівноваженого режиму.

Методом базису симетричних складових при несиметричній напрузі отримана формула

$$q_0(t) = Q_1 - Q_2 + D_0 \cos(2\omega t + \arg \dot{D}_0), \quad (57)$$

де Q_1, Q_2 – реактивні потужності прямої (ПП) і зворотної послідовності (ЗПо).

Потужність (51), що дорівнює $\dot{D}_0 = j(\dot{U}_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_2)$, не співпадає з потужністю $\dot{N}_1 = I_1^* U_1$, що дорівнює $\dot{N}_1 = \dot{I}_1 \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{U}_1$. ($\dot{I}_1, \dot{I}_2; \dot{U}_1, \dot{U}_2$ – комплекси струму і напруги ППо та ЗПо). Зокрема, при симетричній напрузі ($Q_1 = Q, Q_2 = 0$), це дає $\overline{q_0(t)} = Q$ і виправляє помилку «pq-теорії» (де $\overline{q(t)} = -Q$).

Для 3-провідної схеми отримані ортогональні розкладання (рис. 10) 3-комплексу струму в ортонормованих базисах для аналізу: неуврівноваженого режиму і незбалансованого режиму:

$$I_1 = \frac{\dot{N}_1}{U} \cdot v^* + \frac{\dot{K}_0}{U} \cdot v_n = \dot{I}_p m_p + \dot{I}_n m_n; \quad (58)$$

$$I_1 = \frac{S_1^*}{U} \cdot v + \frac{\dot{D}_0}{U} \cdot v_n^* = \dot{I}_b m_b + \dot{I}_u m_u \quad (59)$$

в термінах комплексних потужностей, які характе-

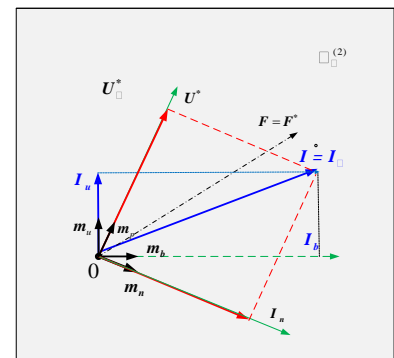


Рисунок 10 – Розклад 3-комплексу тока

ризують ці режими.

Орти фазних v і міжфазних $v_{..}$ напруг попарно ортогональні ($v^* \perp v_{..}$, $v \perp v_{..}^*$), зв'язані рівняннями: $U = Uv$, $U^* = Uv^*$, $U_{..} = Uv_{..}$, $U_{..}^* = Uv_{..}^*$ і утворюють два базису: базис процесів розбалансованого і неврівноваженого режиму. Пари комплексних потужностей неврівноваженого (\dot{N}_1, \dot{K}_0) і незбалансованого (\dot{S}_1^*, \dot{D}_0) режимів пов'язані матрично-векторними рівняннями:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_1^* \\ \dot{D}_0 \end{bmatrix} = A^* \begin{bmatrix} \dot{K}_0 \\ \dot{N}_1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{K}_0 \\ \dot{N}_1 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \dot{S}_1^* \\ \dot{D}_0 \end{bmatrix}, \quad (61)$$

де комплексні коефіцієнти

$$\dot{\mu} = U^* U / |U|^2, \quad \dot{\eta} = [U U^* e_0] / |U|^2 \quad (62)$$

унітарних матриць A^* і A задовольняють умовам $|\dot{\mu}|^2 + |\dot{\eta}|^2 = 1$ і $\dot{\eta}^* = -\dot{\eta}$, та характеризують асиметрію напруг (якщо напруга симетрична, то $\mu = 0$.) Для 3-провідної схеми з синусоїдальними режимами класифікація за допомогою еквівалентних провідностей залишається в силі і формулюється в термінах комплексів \dot{K}_0, \dot{D}_0 . При несиметричній напрузі проведено числове моделювання

Таблиця 1 – Параметри D - навантаження

№	1	2	3	4
\dot{Y}_{AB}	1-0,5j	1- 0.143j	1+0.035j	1+0.122j
\dot{Y}_{BC}	0	0.445j	0.624j	0.624j
\dot{Y}_{CA}	0	-0.715j	-0.537j	- 0.624j

Таблиця 2 – Результати числового моделювання

№	1	2	3	4
l	0,654	0,894	1	0,99
S_B	1.635	1.196	1.07	1.08
P	1.07	1.07	1.07	1.07
Q	0.535	0.535	0	0
$\dot{D}_0^{\&}$	$1.12e^{-j56.23^\circ}$	0	0	0.151j
$\dot{N}_1^{\&}$	$1.2e^{j26.6^\circ}$	$0.166e^{-j26.6^\circ}$	0.149	0
$\dot{K}_0^{\&}$	0.616+j0.93	0.53 + j1.059	1.06j	1.08j
$\dot{Y}_A^{\&}$	$1.87e^{-j0.8^\circ}$	$1.197e^{-j26.57^\circ}$	1.07	0.94
$\dot{Y}_B^{\&}$	$2.076e^{j56.3^\circ}$	$1.197e^{-j26.56^\circ}$	1.07	$1.16e^{j7^\circ}$
$\dot{Y}_C^{\&}$	0	$1.197e^{-j26.57^\circ}$	1.07	$1.16e^{-j7^\circ}$

схеми електропостачання показують як послідовно компенсується: потужність (струм) небалансу (ОЕ2), реактивний струм (ОЕ3), а потім пульсації МП (ОЕ4). У перших 3-х ОЕ режим неврівноважений. Крім того, в ОЕ1 режим і незбалансований.

ОЕ1. Одноплече навантаження (індуктор) включено між фазами А і В.

класифікованих режимів для D – навантаження (табл.1).

В нижче розглянутих обчислювальних експериментах (ОЕ) всі величини приведені у відносних одиницях $|U|=1$.

Моделювання проводилось в середовищі MatCad. 3-комплекс напруги з фазовими координатами $U = (0.616 \ 0.557e^{j236.4^\circ} \ 0.557e^{j123.6^\circ})^*$ має симетричні координати: $\dot{U}_1 = 0.998$, $\dot{U}_2 = 0.07$. Коефіцієнт несиметрії напруги по ЗПо $k_{U2} = 7\%$. Результати розрахунків (табл. 2.) в навантажувальних вузлах з класифікованими синусоїдальними несиметричними режимами при несиметричній напрузі для 3-провідної

Потужність небалансу $D_0 = 1.12$ і реактивна потужність $Q = 0.535$ не дорівнюють нулю і визначають додаткові втрати. Реактивна МП пульсує $q_0(t) = 0.616 + 1.12 \cos(2\omega t - 56.23^\circ)$. Коефіцієнт потужності $\lambda = 0,654$. Режим *незбалансований та нерівноважений*.

Так як $N > P$, то миттєва потужність не тільки пульсує, $p(t) = 1.07 + 1.196 \cos(2\omega t + 26.6^\circ)$ а й осцилює. Коефіцієнт пульсації $\lambda_N = N/P > 1$. Потік енергії двонаправлений. Еквівалентні провідності різні.

ОЕ2. Збалансований режим. Потужність небалансу дорівнює нулю, $D_0 = 0$. Режим збалансований. Реактивна миттєва потужність має тільки постійну складову $q_0(t) = \bar{q}_0 = \Re \dot{K}_0 = 0.53$, яка визначена комплексом непульсуючої потужності, режим *реально незбалансований*. Величина реактивної потужності відмінна від нуля, $Q = 0.535$.

Еквівалентні провідності в фазах однакові $\dot{Y}_A = \dot{Y}_B = \dot{Y}_C = 1.197 e^{-j26.57^\circ}$, але комплексні. Наявність фазового зсуву між трифазним струмом і напругою характеризується коефіцієнтом потужності $\lambda = 0,894 < 1$. Режим *нерівноважений*. Так як $P > N$, то активна МП тільки пульсує, але не осцилює

$$p(t) = 1.07 + 0.17 \cos(2\omega t - 26.6^\circ)$$

Коефіцієнт пульсації $\lambda_N = N/P = 0.159 < 1$. Потік енергії односпрямований.

ОЕ3. Реально збалансований, нерівноважений режим.

Потужність небалансу і реактивна потужність дорівнює 0. Еквівалентні провідності у всіх фазах однакові і дійсні $\dot{Y}_A = \dot{Y}_B = \dot{Y}_C = 1.07$. Режим *реально збалансований* ($\lambda = 1$).

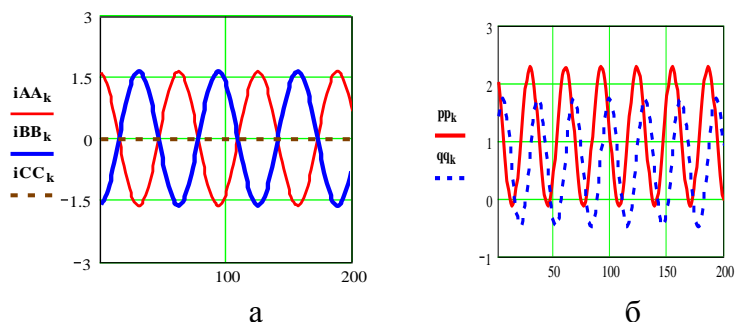


Рисунок 11 – Осцилограми ОЕ1 (нерівноважений і незбалансований режим): (а) миттєві фазні струми; (б) активна і реактивна МП

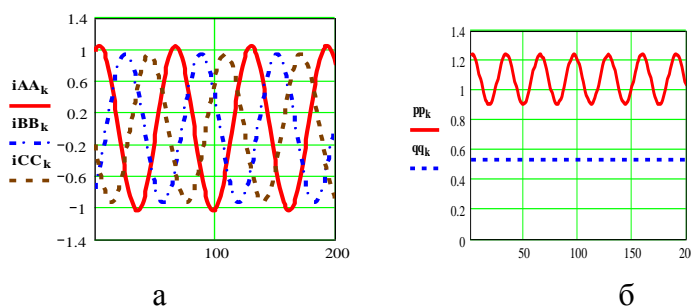


Рисунок 12 – Осцилограми ОЕ2 (нерівноважений і реально незбалансований режим): (а) миттєві фазні струми; (б) активна і реактивна МП.

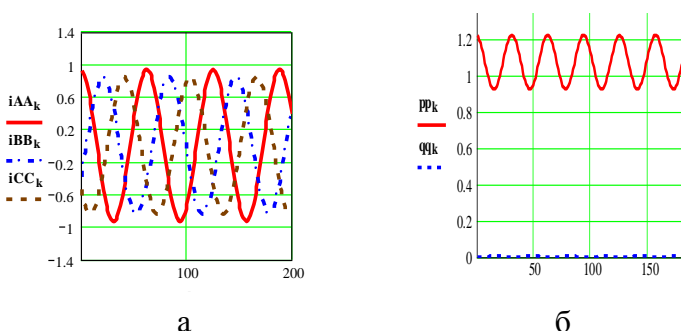


Рисунок - 13. Осцилограми ОЕ3 (нерівноважений і реально-збалансований режим): (а) миттєві фазні струми; (б) активна і реактивна МП.

Фазовий зсув між трифазним струмом і напругою відсутній $q_0(t) \equiv 0 \Leftrightarrow (D_0 = 0) \& (Q = 0)$. Навантаження ОЕЗ дорівнює сумарному навантаженню ОЕ1 і навантаженню LC компенсатора Фризе для ОЕ1. Через $k_{U2} \neq 0$ мають місце пульсації $\dot{N} = 0.149$. Режим неврівноважений – МП пульсує, але не осилує $p(t) = 1.07 + 0.149 \cos 2\omega t$. Коефіцієнт пульсації дорівнює $\lambda_N = N/P = 0,14$.

ОЭ4. Врівноважений і «майже» збалансований режим. Навантаження цього експерименту реалізує сумарне навантаження ОЕ1 і D - навантаження оптимального LC компенсатора пульсацій для ОЕ1. Такий компенсатор усуває неактивний струм $Fryze$ (як в ОЕ3), але додатково в ланцюг джерела вводить струм небалансу для компенсації пульсацій струму $Fryze$, потужність $D_0 = 0.151$ якого на порядок менша потужності небалансу первісного режиму $D = 1.12$. Модуль непульсуючої потужності дорівнює повній потужності $S_B = |\dot{K}_0| = 1.08$.

Таким чином, проведені теоретичні дослідження, числове моделювання підтверджують адекватність, достовірність і цінність запропонованої класифікації ЕР для 3- провідних схем.

У п'ятому розділі розробляється методологія і метод створення оптимального синусоїдального режиму електропостачання при несиметричній напрузі. Аналіз відомих методів компенсації: компенсації потужності пульсацій, методу симетризації струму показав їх некоректну роботу при несиметричній напрузі для 3-провідної схеми. Компенсація методом $Fryze$ забезпечує мінімальні втрати (на 1 Ом). Однак, при несиметричній напрузі отриманий після компенсації $Fryze$, режим джерела неврівноважений. Миттєва потужність активного струму I_{aF} при несиметричній напрузі пульсує з комплексною амплітудою

$$\dot{N}_a = \dot{I}_p U = \dot{\mu} I_a U = \dot{\mu} P \neq 0, \quad (63)$$

що визначається параметром несиметрії напруги (62) $\mu = 2k_{U2}/(1+k_{U2}^2) \neq 0$ за допомогою коефіцієнта несиметрії напруги ЗПо k_{U2} .

Запропоновано евристичний метод компенсації (рис. 15), який при несиметричній напрузі забезпечує поставку активного струму $Fryze$ без пульсацій МП для будь-якого незбалансованого навантаження. Метод компенсації використовує представлення трифазного струму одночасно в двох базисах (58–59). 3-комплекс струму джерела після компенсації

$$I_S = I_{aF} + I_{su} = I_a m_b - I_a (\dot{\mu}/\dot{\eta}) m_w = I_a / \eta^* m_n, \quad (I_a = P/U) \quad (64)$$

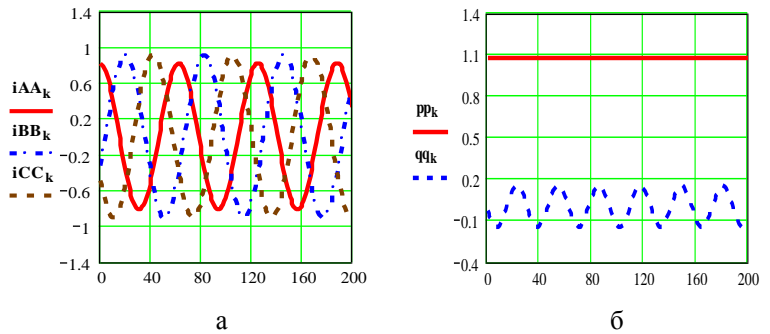


Рисунок – 14. Осцилограми ОЕ4 (урівноважений і «майже» збалансований режим): (а) миттєві фазні струми; (б) активна і неактивна МП.

колінеарний орту $\mathbf{m}_n = \mathbf{v}_n = \mathbf{v} \times \mathbf{e}_0$ міжфазних напруг і містить активний струм I_{aF} і додатковий струм небалансу I_{Su} . Пульсуючі компоненти цих струмів однакові за величиною, але протилежні за напрямком $(I_{aF})_p = -(I_{Su})_p$.

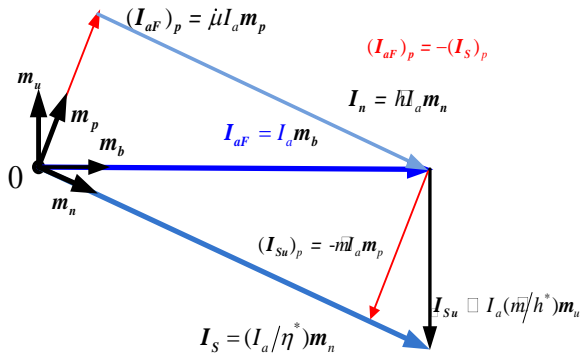


Рисунок 15 – Векторна діаграма компонент струму евристичного методу компенсації

Це забезпечує врівноважений режим в ланцюзі джерела $(I_S)_p = 0 \Rightarrow I_S = (I_S)_n$.

Запропонований метод в ланцюзі джерела з мінімальними втратами забезпечує врівноважений режим і дозволяє забезпечити поставку енергії з постійною МП, рівній активній (середній) потужності початкового неуврівноваженого і незбалансованого режиму. Метод забезпечує коефіцієнт *потужності*, який не залежить від

ступеня несиметрії навантаження і обумовлений тільки ступенем асиметрії напруги (62)

$$\lambda = \eta = (1 - k_{U2}^2) / (1 + k_{U2}^2). \quad (65)$$

Коефіцієнт *потужності* в інтервалі зміни $k_{U2} \in [0; 5\%]$ відрізняється від одиниці в 3 знаку після коми ($\lambda \geq 0.99$).

При несиметричній напрузі методом множників Лагранжа для цільової функції $F(\mathbf{I}) = |\mathbf{I}|^2 = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2$ з допустимою областю, яка визначена двома умовами в комплексній формі:

1. $\Re[U \cdot \mathbf{I}^*] = P$ – активна потужність первісного і нового режимів співпадають;
2. $\mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = 0$ – в новому режимі пульсації відсутні, доведено, що запропонований метод створення врівноваженого режиму оптимальний. Знайдене рішення задачі умовної мінімізації втрат (на 1 Ом)

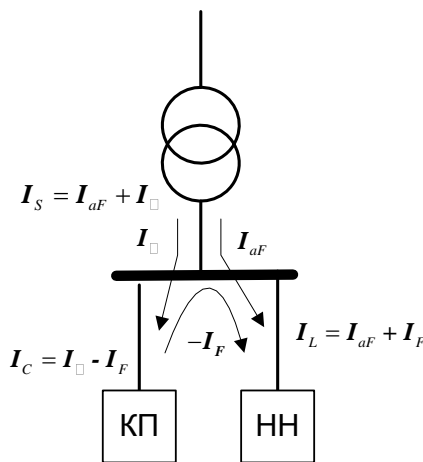


Рисунок 16 - Розподіл компонент струму в ланцюзі джерела, КП і навантаження

$$\mathbf{I}_S = \frac{P}{\eta^2 U^2} (\mathbf{U} - i \mathbf{U}^*) = \frac{P}{U \eta^*} \mathbf{v}_n \quad (66)$$

збігається з отриманим раніше евристичним рішенням (64). Запропонований метод компенсації забезпечує режим

споживання (рис.16), який в 3-провідному ланцюзі джерела: урівноважений $p(t) \equiv P$ (МП - постійна), має повністю скомпенсовану реактивну потужність $Q = 0$, «майже» реально збалансований $D = \mu \cdot S_B \approx 0$.

Активна потужність струму компенсатора дорівнює нулю, що дозволяє реалізувати такий компенсатор чисто реактивними елементами. Для 3-провідної схеми по поточним вимірам 3-комплексу міжфазних несиметричних напруг $\sqrt{3}\mathbf{U}_n = \mathbf{U} \times \mathbf{e}_0 = [\dot{U}_{ab} \ \dot{U}_{bc} \ \dot{U}_{ca}]$ та струму $\mathbf{I}_C = [i_a^K \ i_b^K \ i_c^K]$, який треба компенсувати (активна потужність якого дорівнює нулю), отримано аналітичні вирази для розрахунку реактивних провідностей \mathbf{D} – компенсатора:

$$B_{AB}^K = \frac{\Re[\dot{I}_b^K U_{bc}^*]}{\Im[\dot{U}_{ab} U_{bc}^*]}, \quad B_{BC}^K = \frac{\Re[\dot{I}_c^K U_{ca}^*]}{\Im[\dot{U}_{bc} U_{ca}^*]}, \quad B_{CA}^K = \frac{\Re[\dot{I}_a^K U_{ab}^*]}{\Im[\dot{U}_{ca} U_{ab}^*]}. \quad (67)$$

Для методу компенсації, який створює *оптимальний врівноважений режим* (ОВР), проведено розрахунок КП та моделювання його роботи. Моделювання проводилося в середовищі MatCad. Параметри первинних режимів і їх енергетичні характеристики зведені в табл. 3. У розглянутих нижче прикладах всі величини приведені у відносних одиницях, $|U|=1$. 3-комплекс напруги $\mathbf{U} = (0.616, \ 0.557e^{j236.4}, \ 0.557e^{j123.6})$ має симетричні координати $\dot{U}_1=0.998$, $\dot{U}_2=0.07$. Коефіцієнт несиметрії напруги $\kappa_{U2}=7\%$, $\eta=0.99$. В усіх трьох прикладах навантаження вибрано так, що забезпечується передача енергії з однаковою активною потужністю $P=1.07$ о.е.

Сумарні міжфазні провідності «навантаження+КП» означені діагональною матрицею, яка дорівнює сумі діагональних матриць провідностей: навантаження і компенсатора $\mathbf{Y}_\Sigma = \mathbf{Y}_n + j\mathbf{B}_n^K$, $\mathbf{Y}_n = \text{diag}\{\dot{Y}_{AB}^\Sigma, \dot{Y}_{BC}^\Sigma, \dot{Y}_{CA}^\Sigma\}$, $j\mathbf{B}_n^K = \text{diag}\{jB_{AB}^K, jB_{BC}^K, jB_{CA}^K\}$. Міжфазні реактивні провідності $B_{AB}^K, B_{BC}^K, B_{CA}^K$ компенсатора, що розраховані згідно (67) і параметри створеного ОВР в ланцюгу джерела приведені в табл. 4.

Приклад 1. Модифікована схема Штейнметца. Одноплече активне навантаження $G_{AB}=1$ включене між фазами А і В. Сумарні провідності «навантаження+КУ» $\dot{Y}_{AB}^\Sigma = 1 + j0.122$, $\dot{Y}_{BC}^\Sigma = j0.624$, $\dot{Y}_{CA}^\Sigma = -j0.624$ відрізняються від провідностей ($\dot{Y}_{AB}^\Sigma = 1$, $\dot{Y}_{BC}^\Sigma = -\dot{Y}_{CA}^\Sigma = jG_{AB}/\sqrt{3} = j0.577$) відомої *Steinmetz' circuit* при симетричній нарузі.

Приклад 2. Індуктор. Одноплече активно-індуктивне навантаження включене між фазами А і В. Провідності КП:

Таблиця 3 – Первісний режим без КП

№	1	2	3
Y_{AB}^Σ	1	1-j4	0.3-j0.1
Y_{BC}^Σ	0	0	0.6-j0.3
Y_{CA}^Σ	0	0	0.22-j0.2
S_B	1.463	6.031	1.343
P	1.07	1.07	1.07
Q	0	4.279	0.579
D	0.998	4.113	0.595
N	0.64+j0.86	4.07-j1.7	-0.27+j0.13
l	0.741	0.177	0.825

Таблиця 4– «нагрузка+КП»

№	1	2	3
S_B	1.07	1.07	1.07
P	1.07	1.07	1.07
Q	0	0	0
D	0.15	0.15	0.151
N	0	0	0
B_{AB}^K	0.122	4.122	-0.027
B_{BC}^K	0.624	0.624	0.350
B_{CA}^K	-0.624	-0.624	0.287
λ	0.99	0.99	0.99

$B_{AB}^K = 4.122$, $B_{BC}^K = 0.624$, $B_{CA}^K = -0.624$. Структурна несиметрія навантаження така ж сама, як і в першому прикладі і компенсується міжфазними провідностями ($B_{AB}^{K'} = 0.122$, $B_{BC}^K = 0.624$, $B_{CA}^K = -0.624$). Додаткова індуктивна провідність навантаження ($B_{AB} = -4$) в плечі AB компенсується паралельним приєднанням ємності КП ($B_{AB}^{K''} = 4$, $B_{AB}^K = B_{AB}^{K'} + B_{AB}^{K''}$). Сумарні провідності «навантаження + КП» $\dot{Y}_{AB}^\Sigma = 1 + j(4 - 4 + 0.122) = 1 + j0.122$, $\dot{Y}_{BC}^\Sigma = j0.624$, $\dot{Y}_{CA}^\Sigma = -j0.624$.

Приклад 3. Типове 3-фазне несиметричне навантаження.

Три однофазні активно-індуктивні навантаження ($\cos \varphi_{AB} = 0.894$, $\cos \varphi_{BC} = 0.919$, $\cos \varphi_{AC} = 0.447$) формують трифазне несиметричне навантаження.

Метод ОВР забезпечує повну компенсацію реактивного і пульсуючого навантаження і "майже" повну компенсацію потужності небалансу при коефіцієнті потужності $\lambda = \eta = 0.99$.

Розклад повного струму 3-проводної схеми

$$I_1 = \underbrace{\frac{P_1}{|U_1|^2 \eta^*} U''}_{I_s} + \underbrace{\frac{j\dot{\mu}}{\dot{\eta}} \frac{P_1}{|U_1|^2} U''^* + \frac{-jQ_1}{|U|^2} U + \frac{\dot{D}_0}{|U_1|^2} U''^*}_{I_c},$$

одержаний в рамках уточнюючій ВММ для синусоїдального режиму, реалізується програмою в пакеті Matlab. Струм в джерелі (66) забезпечує ОВР. Для прикл. 2 поведінка кривих струму в фазах і МП до і після компенсації представлені рис. 17.

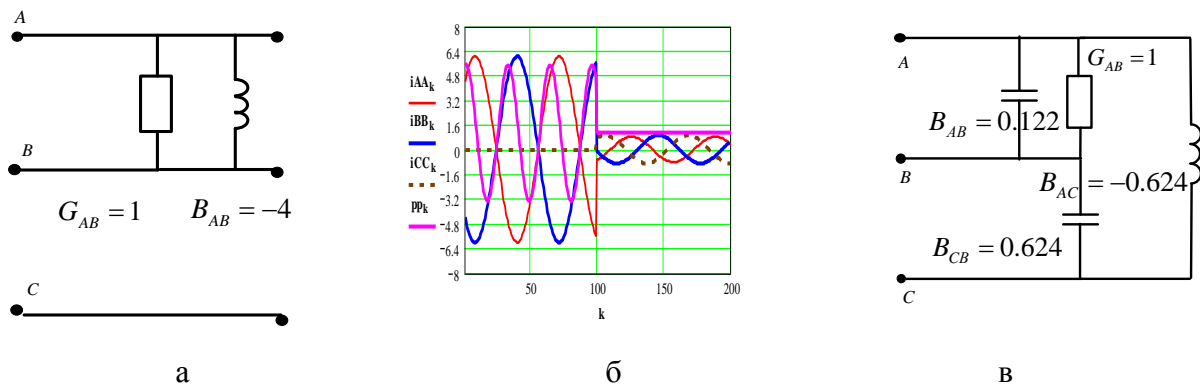


Рисунок 17 – Модифікована схема Штейнметца (для індуктора, пр.2) при несиметричній напрузі: (а) одноплече активно-індуктивне навантаження до компенсації; (б) осцилограми кривих струму в фазах і МП до і після компенсації; (в) схема «навантаження + КП».

В 4-проводному ланцюзі додаткова компенсація струму НПо забезпечує 0- врівноважений режим.

У шостому розділі запропонована методологія розрахунку додаткових втрат від симетрії реактивних елементів навантаження і несиметрії активно-реактивного навантаження. Основою розробленої методології стала математична модель представлення всіх складових рівняння потужностей незбалансова-

ного режиму (48) через комплексні потужності фаз ($\dot{S}_a \neq \dot{S}_b \neq \dot{S}_c$) і розкладання цього рівняння на два незалежних рівняння при симетричній напрузі: для активних і реактивних потужностей фаз $P_k, Q_k, k \in \{a, b, c\}$, що обумовлені чисто активними і чисто реактивними елементами навантаження

$$P_B^2 = P^2 + P_D^2, \quad Q_B^2 = Q^2 + Q_D^2. \quad (68)$$

Тут:

$$P_B^2 = 3 \sum_{k \in \{a, b, c\}} P_k^2, \quad Q_B^2 = 3 \sum_{k \in \{a, b, c\}} Q_k^2 \quad (69)$$

– квадрати ПП чисто активних і чисто реактивних елементів навантаження;

$$P_D^2 = (P_b - P_c)^2 + (P_a - P_c)^2 + (P_a - P_b)^2, \quad Q_D^2 = (Q_b - Q_c)^2 + (Q_a - Q_c)^2 + (Q_a - Q_b)^2 \quad (70)$$

– квадрати ПН (несиметрії) активних і реактивних елементів навантаження;

$$P = \sum_{k \in \{a, b, c\}} P_k, \quad Q = \sum_{k \in \{a, b, c\}} Q_k \quad (71)$$

– активна та реактивна потужність.

Методика дозволяє оцінити додаткові втрати як від несиметрії активних і реактивних елементів (потужність небалансу), так і від симетрії реактивних елементів (реактивна потужність) електрообладнання, що підключається. Так, для трьох асинхронних двигунів (АД) з однієї лінійки ($P_{НОМ} = 7,5-15$ кВт, $\cos\phi_{НОМ} = 0,88-0,91$), що включені в різні фази, додаткові втрати становлять 20%. З них 9% обумовлені несиметрією навантаження. Характерні приклади навантажень, що призводять до незбалансованого режиму, наведено на рис. 18. У всіх прикладах реактивна потужність трьох фаз дорівнює нулю $Q = Q_a + Q_b + Q_c = 0$.

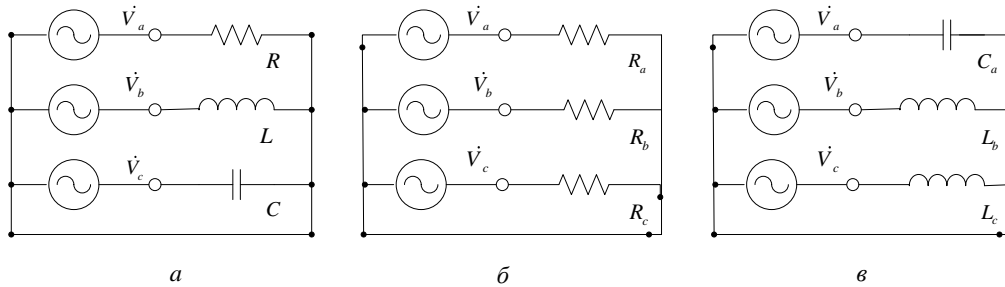


Рисунок - 18. Приклади несиметричного навантаження

Для кожного прикладу (рис. 18) з рівнянь потужностей (68-71) отримані формули, що відображають структуру навантаження:

$$\text{а. } S_B^2 = P^2 + \underbrace{2P^2 + 6Q^2}_{\text{втрати від асиметрії}},$$

$$\text{б. } S_B^2 = \underbrace{(P_a + P_b + P_c)^2}_{\text{оплачується}} + \underbrace{(P_b - P_c)^2 + (P_a - P_c)^2 + (P_a - P_b)^2}_{\text{втрати від асиметрії}},$$

$$\text{в. } S_B^2 = D^2 = \underbrace{(Q_b - Q_c)^2 + (Q_a - Q_c)^2 + (Q_a - Q_b)^2}_{\text{втрати від асиметрії}}.$$

Існуючими методологіями втрати від асиметрії навантаження не враховуються і не оплачуються. Тому коефіцієнт потужності для схеми рис.18,а і рис.18,б

обчислений за скороченим рівнянням потужності (32) (куди не входить потужність небалансу) дорівнює 1, що не відповідає дійсності. Запропоновано метод оцінки додаткових втрат по поточним вимірам. Методика оцінки за поточними вимірами застосовувалася для обробки протоколів вимірів, отриманих приладом «Енергомонітор 3.3т», який використовується АК «Харківобленерго» Харківські високовольтні РЕС. Розрахунки за вибірками показали, що в нормальному режимі в припущенні, що навантаження має бути симетричним, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_s = 0.96$. Істинний коефіцієнт потужності з урахуванням незбалансованості режиму (навантаження несиметричне) $\lambda = \lambda_p = 0,853$. Коефіцієнти потужності активної потужності, реактивної потужності і потужності небалансу :

$$\lambda_p = \lambda = \frac{P}{S_B} = 0,853, \quad \lambda_Q = \frac{|Q|}{S_B} = 0,250, \quad \lambda_D = \frac{D}{S_B} = 0,456.$$

Доля втрат, що оцінюється квадратами цих коефіцієнтів:

$$\lambda_p^2 = 0,728, \quad \lambda_Q^2 = 0,063, \quad \lambda_D^2 = 0,209.$$

При цьому, струм, що асоційований з неактивною потужністю, визначає 27% додаткових втрат. З них 20.9% обумовлені несиметрією навантаження.

У розділі сформульовані і обґрунтовані пропозиції політики підвищення якості електроенергії в 3-фазній мережі, що засновані на принципі диференційованої оплати, по кожній ЕКС, залежно від ступеня шкоди, що наноситься електропостачанню (постачальнику і споживачам). Ортогональне розкладання 3-фазного струму на ЕКС

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_u(t) \Leftrightarrow I = I_a + I_r + I_u \quad (72)$$

забезпечує набір д.з. трифазних ЕКС:

$$I_a = |I_a|, \quad I_r = |I_r|, \quad I_u = |I_u| \quad (73)$$

і характеризує різномірний енергетичний склад і величини, що необхідні для нормальної роботи неідеального навантаження.

Активна, реактивна та незбалансована потужності (величини однакової фізичної розмірності потужності - вольтампери):

$$P = I_a U, \quad Q = \text{sign}(Q) I_r U, \quad D = I_u U. \quad (74)$$

визначають розкладання повної (уявної) потужності. Інтегрування величин (74) за час споживання визначає ЕЕ, яка забезпечує споживаний склад 3-фазного струму. Компоненти неактивного струму СР (звичайний реактивний та струм небалансу) призводять до різного ступеню погіршення якості електроенергії. Це робить доцільним створення лічильника, що вимірює величини (74), для застосування методу диференційованої оплати ЕКС з різними тарифними коефіцієнтами.

Показано, що для фіксованого рівня напруги вартість електроенергії, що витрачається на поставку кожної ЕКС, є лінійною функцією д.з. компоненти, а вартість втрат від цієї компоненти струму є квадратичною функцією її д.з. Це дозволяє вибором тарифних коефіцієнтів забезпечити оплату поставки ЕЕ кожної ЕКС, у вартість якої включена вартість втрат (за транзит).

Окрема оплата кожної ЕКС повного струму потребує встановлення (за рахунок постачальника) вимірювального лічильника кожної компоненти в кожній ТПі споживача (рис.19, П1-П4).

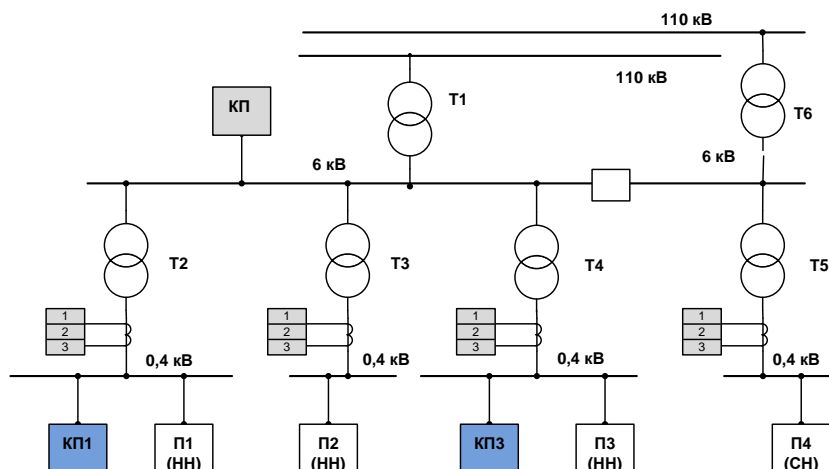


Рисунок –19. Приклад схеми підключення лічильників обліку електро – енергії та КП (лічильники: 1 - активної потужності; 2 - реактивної потужності; 3 - потужності небалансу).

Споживач оцінить окупність встановлення КП (у своїй мережі, «нижче» лічильника за свій рахунок) коли буде оплачувати окремі рахунки за ЕКС. Тільки компенсуючи неактивні компоненти струму в своїй мережі споживач видаляє їх з ланцюгів постачальника і позбавляється від оплати за їх поставку, зменшує втрати і покращує якість ЕЕ. До шини 6 кВ підключено три споживача (П1, П2, П3) з несиметричним навантаженням. Наявність КП споживачів П1 і П3 приводить до повної або часткової компенсації неактивного струму, що, в свою чергу, дає можливість оплачувати рахунки тільки за електроенергію активної потужності. Споживач П2 не встановив КП і платить за всі компоненти струму. До шини 6 кВ постачальником приєднаний груповий компенсатор, який усуває неактивні струми від усіх споживачів, підключених до цієї шини (зокрема скомпенсує всі неактивні струми спричинені П2). Встановлюючи груповий КП, постачальник вкладає кошти, щоб полегшити роботу своїх генеруючих потужностей і мереж та забезпечити необхідну якість постачання електроенергії (згідно з договором купівлі-продажу) для всіх споживачів, яких він обслуговує.

Споживач П4 з симетричним навантаженням (чутливий до несиметрії напруги) підключен до другої секції шини 6 кВ, на напругу якої слабо впливають несиметричні споживачі першої секції шини 6 кВ. Пропонована політика оплати за поставлену електроенергію, яка реалізує адресну для споживача і диференцуючу по ЕКТ стратегію поділяемих вимірювань та оплати в кожній ТПі споживача в умовах договірних відносин забезпечить надійне підвищення якості електроенергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена і вирішена науково-технічна проблема створення узагальненої теорії потужності, єдиного комплексного підходу до

компенсації та обліку неактивних складових ПМ, зниження втрат ЕЕ в електро-системі, забезпечення оптимального режиму споживання ЕЕ в ТПі споживача до мережі з несиметричною напругою.

В рамках даного напрямку одержані наступні наукові результати:

1. Аналіз стану ТП багатофазних систем з синусоїдальними і несинусоїдальними несиметричними режимами засвідчив суттєву неповноту ТП при несиметричній напрузі і визначив напрямки її подальшого розвитку. Порівняльний аналіз основних підходів до компенсації неактивних складових ПП при несиметричній напрузі показав відсутність єдиного комплексного підходу до компенсації та обліку неактивних складових ПП.
2. Запропоновано загальний аналітичний підхід подання ЕП в 3-фазній системі, який дозволив розробити узагальнену ВММ для 3/4-провідних схем поставки ЕЕ. Розроблена векторна математична модель ЕП дозволяє з загальних позицій представити клас моделей, що використовуються в теорії МП і вважати 3-провідну схему електропостачання окремим випадком 4-провідної схеми, в якій енергетичні процеси 0-врівноважені.
3. Незважаючи на те, що визначення векторної МП не однозначне, в роботі обґрунтовано введено нове визначення векторної МП. За станом векторної МП (додатково до неврівноваженому режиму, який визначається за скалярною миттєвою потужністю) введено поняття незбалансованого, збалансованого і реально збалансованого режимів. Це дозволило, використовуючи векторну МП, класифікувати енергетичні несиметричні режими одночасно для 3/4-провідних схем поставки.
4. Розроблена за допомогою візуального програмування Simulink в обчислювальному середовищі пакету Matlab програма моделює 4-провідну схему постачання та споживання, реалізує узагальнену математичну модель ТМ і дозволяє аналізувати класифіковані ЕР.
5. Запропоноване представлення синусоїдальних процесів в комплексній формі дозволило отримати комплексну форму векторної МП і визначити нові комплексні векторні потужності (3-комплекси). Отримано загальні аналітичні вирази для постійної і змінної складових векторної МП синусоїдальних процесів, як в чотирьох, так і в трипровідній 3-фазній схемі постачання електроенергії. Встановлені зв'язки між характеристиками теорій МП і інтегральними потужностями. При несиметричній напрузі для 4/3-х провідних схем отримані аналітичні формули потужності небалансу (потужність несиметрії навантаження для 4-провідної схеми) безпосередньо по 3-комплексам струму і напруги та дана енергетична інтерпретація складових векторної МП.
6. Аналіз класифікованих енергетичних синусоїдальних режимів при несиметричній напрузі привів до розробки спеціального математичного апарату векторної алгебри комплексних векторів (3-комплексів) з операціями комплексного скалярного і векторного добутку, який дозволив отримати рівняння потужностей розглянутих режимів і створити уточнюючу ВММ несиметричних СР.
7. Неврівноважений і незбалансований режими характеризуються своїми рівняннями потужностей, які містять різні складові ПП. У незбалансованому

режимі окрім активної і реактивної потужності ПП квадратичне містить потужність небалансу. У неврівноваженому режимі нова неппульсуюча потужність квадратично доповнює ПП потужність пульсацій СР.

8. Визначено, що кожному рівнянню потужностей і його складовим однозначно відповідає ортогональне розкладання 3-фазного струму на складові з однозначним енергетичним змістом. Ортогональні складові (деталізуючого) розкладання 3-фазного струму незбалансованого режиму (ЕКС: активний, реактивний і незбалансований струм) використані для розробки методології розділяючого обліку споживаної ЕЕ.

9. Показано, що для 3-провідної схеми поставки комплексні векторні потужності: 3-комплекси потужності небалансу і неврівноваженою потужності - комплексні величини. Звичайна комплексна потужність і комплексна потужність небалансу повністю визначають рівняння потужностей незбалансованого режиму. Потужність пульсацій і нова (комплексна) врівноважена потужність повністю визначають рівняння потужностей неврівноваженого режиму. При несиметричній напрузі отримано аналітичний зв'язок комплексних складових ПП цих двох режимів, що дозволило знайти струм джерела, якій забезпечує оптимальний врівноважений режим 3-провідної схеми поставки.

10. Для 3-провідної схеми розроблено евристичний метод компенсації неактивних складових ПП незбалансованого режиму з одночасним усуненням пульсацій МП при несиметричній напрузі. Метод компенсації забезпечує електропостачання з постійною МП, яка дорівнює активній потужності початкового режиму при гарантованому коефіцієнті потужності (який залежить тільки від ступеню несиметрії напруги). Методом множників Лагранжа доведено оптимальність запропонованого методу.

11. При несиметричній напрузі отримані загальні аналітичні вирази для розрахунку параметрів реактивних елементів компенсатора для любого струму, активна потужність якого дорівнює нулю. Показано, що запропонований метод компенсації усуваючи різні складові неактивного струму з ланцюга джерела, забезпечує ОВР та ефективно працює, навіть якщо коефіцієнти несиметрії напруги вище гранично допустимих.

12. Реалізація розробленого методу компенсації за допомогою візуального програмування Simulink в обчислювальному середовищі пакету Matlab і проведення числових експериментів підтвердили достовірність результатів аналітичних досліджень.

13. Визначено, що при симетричній напрузі усі компоненти рівняння потужностей незбалансованого режиму можна виразити через комплексні потужності фаз. Це дозволило розробити методику та алгоритм аналітичного розрахунку додаткових втрат від несиметрії активно-реактивних елементів навантаження і симетрії реактивних елементів навантаження підключаємого електрообладнання.

14. На основі оцінки і розрахунку складових рівняння потужності незбалансованого режиму розроблено методологію розрахунку втрат за вибіркою вимірювань 3-комплексів струму і напруги.

15. Показано, що для фіксованого рівня напруги вартість електроенергії (потужності) кожної ЕКС є лінійною функцією від д.з. цієї компоненти, а вартість втрат цієї компоненти струму є квадратичною функцією її діючого значення. Для кожної ЕКС це дозволяє вибором тарифних коефіцієнтів оплати втрат включити в оплату поставки ЕЕ і розглядати: втрати ЕЕ - як витрата на транзит, а електроенергію - як продаваний однорідний товар.

16. Запропонована методологія обліку та оплати дозволяє врахувати різну ступінь впливу ЕКС на якість електроенергії. В умовах договірних відносин запропонована методологія забезпечує споживачеві вибір згідного для нього способу споживання ЕЕ неактивного струму: або від постачальника з оплатою по вимірювальному лічильнику, або від свого КП без оплати ЕЕ. Запропонована методологія забезпечує постачальнику надійну політику підвищення якості електроенергії в рамках несиметрії напруги і навантаження і стимулює установку КП споживачем.

17. Результати дисертаційної роботи використані у ТОВ «ТЕССА» (м. Харків) , ТОВ «Хартеп» (м. Харків) та у навчальному процесі Національного технічного університету «ХПІ» для студентів спеціальностей 05070106 «Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії».

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Сиротин Ю. А. Неадекватность теории мгновенной реактивной мощности целям компенсации / Ю. А. Сиротин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ „ХПІ”. – 2006. – вип. 28. - С. 122 – 131.
2. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие тока в трехфазной несимметричной системе / Ю. А. Сиротин // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: Вид-во ПГТУ. – 2008. – Ч. 2, вип. 18. – С.81-87.
3. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю. А. Сиротин // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: РВК НГУ.– 2008.– №30.– С. 197-204.
4. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие трёхфазного тока интерфейса "поставщик–потребитель" / Ю. А. Сиротин // Электрика. – Москва: ООО «Наука и технологии». – 2008. – № 10. – С. 16–22.
5. Сиротин Ю. А. Качество энергоснабжения и энергопотребления в разбалансированной трёхфазной системе/ Ю. А. Сиротин // Электрика. – Москва: ООО «Наука и технологии». – 2009. – № 6. – С. 22-26.

6. Сиротин Ю. А. Качество энергоснабжения и энергопотребления в разбалансированной трёхфазной системе (окончание) / Ю. А. Сиротин // *Электрика*. – Москва: ООО «Наука и технологии». – 2009. – № 7. – С. 15-21.
7. Сиротин Ю. А. Мощность разбаланса и пульсации мгновенной мощности при симметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // *Электрика*. – Москва: ООО «Наука и технологии». – 2009. – №11. – С. 22-28.
8. Сиротин Ю. А. Энергетические компоненты трехфазного тока, их оплата и компенсация / Ю. А. Сиротин // *Электрика*. – Москва: ООО «Наука и технологии». – №4. – 2010. – С. 7-12.
9. Сиротин Ю. А. Поділ якості постачання та споживання електроенергії в трипровідній системі з несиметричною напругою / Ю. А. Сиротин // *Електроінформ*. – Львів: ЕКО інформ. – 2010. – №2-3. – С.8-11.
10. Сиротин Ю. А. Δ – симметризатор – компенсатор Фризе / Ю. А. Сиротин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків : НТУ „ХПІ” .– 2010. – вип. 1. – С. 145-157.
11. Сиротин Ю. А. Анализ энергетических процессов в трехпроводной цепи / Ю. А. Сиротин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків : НТУ „ХПІ” .– 2011. – вип. 41. – С. 118-133.
12. Сиротин Ю. А. Схема симметризации Штейнметца как частный случай оптимального компенсатора Фризе / Ю. А. Сиротин // *Электрика*. – Москва: ООО «Наука и технологии». – 2011. – №1. – С. 16-21.
13. Sirotn. Ju. A. Fryze’s compensator and Fortescue transformation // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – 2011. – №1. – P. 101-106
14. Сиротин Ю. А. Пульсации и осцилляции мощности при сбалансированной нагрузке / Ю. А. Сиротин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків : НТУ „ХПІ”. – 2011. – вип. 3. – С. 121-136.
15. Сиротин Ю. А. Ток небаланса и ток пульсаций при несимметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // *Технічна електродинаміка*. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2012. – № 2. – С. 42–43.
16. Сиротин Ю. А. Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной четырехпроводной цепи / Ю. А. Сиротин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ „ХПІ” .– 2012. – вип. 49. – С. 120-128.
17. Сиротин Ю. А. Ток, мощность и уравнение пульсаций в трехфазной системе / Ю. А. Сиротин // *Вісник Національного технічного університету*

- “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”.– 2012.– вип. 23. – С. 146-159.
18. Сиротин Ю. А. Структурное разделение процессов в трехфазной четырехпроводной цепи и компенсация тока нейтрали / Ю. А. Сиротин // Електротехніка і електромеханіка. – № 6. – 2012. – С. 66-70.
 19. Сиротин Ю. А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ.– 2013. – № 3. – С. 73–80.
 20. Сиротин Ю. А. Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной трехпроводной системы / Ю. А. Сиротин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка та енергетика». –Донецьк: ДонНТУ. – 2013. –№ 2(15). – С. 234–240.
 21. Сиротин Ю. А. Энергетические режимы трехфазной трехпроводной цепи / Ю. А. Сиротин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ „ХПІ”.– 2013 .– № 17. – С. 129-143.
 22. Сиротин Ю. А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2013. – №6. – С. 57–65.
 23. Sirotin Iu. A. Non-pulsed mode of supply in a three-phase system at asymmetrical voltage // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2013.– no.7. – P. 54 -58.
 24. Сиротин Ю. О. Локальні енергетичні режими в трипровідній мережі та компенсація неактивних потужностей / Ю. А. Сиротин // Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка. –Харків: ХНТУСГ. – 2013. – вип. 141.– С. 19–21.
 25. Сиротин Ю. А. Расчет реактивных проводимостей компенсатора для трехпроводной сети / Ю. А. Сиротин // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2014.– №1 – С.71-74.
 26. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку /Ю. А. Сиротин // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: зб. наук. праць за матеріалами VI міжнар. наук.– конф. 21-23 травня 2008 р. / М-во освіти і науки України, НАН України [та ін.] .– Маріуполь: Вид-во ПГТУ, 2008. – С. 211–214.
 27. Сиротин Ю. А. Расчёт дополнительных потерь от несимметрии нагрузки / Ю. А. Сиротин // Матеріали XXXIX междунар. науч.-практ. конф. ["Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в

условиях ресурсных ограничений"] (Москва, 16-20 ноября 2009 г.) / М-во образования и науки РФ.- Москва: Технетика, 2009. – Т.1. – С. 29-40.

- 28.Sirotin. Iu. A. LC - Fryze's compensator under asymmetrical voltage // International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of 10th Conference – seminar, (Poland, Łagów, 15-18 June 2010) Łagów: UZG. – P. 160-165.

АНОТАЦІЇ

Сіротін Ю. О. Компенсація та облік реактивної потужності в електроенергетичних системах з несиметричними режимами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2015 р.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми створення узагальненої теорії потужності, єдиного комплексного підходу до компенсації та обліку неактивних складових ПП для забезпечення оптимального режиму споживання ЕЕ в точці підключення неідеального навантаження до мережі з несиметричною напругою.

Розроблена узагальнена векторна математична модель (ВММ), що класифікує за допомогою векторної миттєвої потужності (МП) енергетичні режими (ЕР) в 4/3-провідній 3-фазній схемі електропостачання. Для синусоїдальних процесів при несиметричній напрузі створена уточнююча ВММ. Знайдено аналітичні вирази для інтегральних характеристик ЕР режимів. Кожен класифікований режим представлений своїм рівнянням потужності і еквівалентним йому ортогональним розкладанням 3-фазного струму. Програмна реалізація розроблених аналітичних моделей і проведені обчислювальні експерименти підтвердили достовірність теоретичних досліджень.

При несиметричній напрузі розроблено новий метод оптимальної компенсації неактивних складових повної потужності (ПП) з одночасним усуненням пульсацій МП з кола джерела. Отримані загальні аналітичні вирази для розрахунку параметрів оптимального компенсатора.

На основі оцінки і розрахунку складових рівняння потужності незбалансованого режиму розроблена методологія розрахунку втрат по вибірці вимірювань. Створено методику аналітичного розрахунку додаткових втрат від несиметричного активно-реактивного навантаження, що підключається на етапі проектування.

Сформульовані та обґрунтовані пропозиції скорочення втрат електроенергії, які враховують різний ступінь впливу неактивних складових ПП на якість електроенергії, стимулюють споживача встановлювати компенсатори неактивних складових ПП і забезпечують постачальнику надійну методологію підвищення якості електроенергії в рамках несиметрії навантаження та несиметрії напруги.

Ключові слова: система електропостачання трифазна, компенсація реактивної потужності, якість електропостачання, структура та схеми електропостачання, математичне моделювання електроенергетичних процесів, складові повної потужності, векторна миттєва потужність, незбалансований режим, рівняння потужностей, активний струм, несиметричне навантаження, несиметрична напруга, несиметричний режим.

Сиротин Ю. А. Компенсация и учет реактивной мощности в электротехнических системах с несимметричными режимами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической проблемы создания обобщенной теории мощности (ТМ), единого комплексного подхода к компенсации и учету неактивных составляющих полной мощности (ПМ) для обеспечения оптимального режима потребления электрической энергии (ЭЭ) в точке подключения неидеальной нагрузки к сети с несимметричным напряжением.

На основе теоретических исследований, использующих метод ортогонального разложения векторов мгновенных значений 3-фазного тока и напряжения, получена обобщенная векторная математическая модель (ВММ), которая классифицирует электроэнергетические режимы (ЭР) в 3-фазной схеме электроснабжения с помощью векторной мгновенной мощности (ММ). Аналитическая модель 3-проводной схемы обеспечивается специальным (0-уравновешенным) режимом обобщенной модели 4-проводной схемы электроснабжения. Разработанная ВММ обобщает целый класс моделей, используемых в теориях ММ. Вычислительные эксперименты с помощью программной реализации в вычислительной среде пакета Matlab разработанной аналитической модели подтвердили достоверность теоретических исследований.

На основе разработанной векторной алгебры комплексных векторов (3-комплексов) для синусоидальных энергетических процессов (ЭП), при несимметричном напряжении создана уточняющая ВММ теории мощности интегральных (усредненных) составляющих ПМ. Для 4/3-проводных 3-фазных схем поставки электроэнергии найдены общие аналитические выражения для (новых и известных) интегральных характеристик несбалансированного и неуравновешенного режимов. В каждом режиме, непосредственно по 3-комплексам тока и напряжения для составляющих ПМ, получены аналитические выражения и установлены их связи с обычной ММ и векторной ММ. Теоретически и числовым моделированием показано, что при несимметричном напряжении и несимметричной нагрузке синусоидальный режим может быть одновременно и несбалансированным и неуравновешенным, и имеет два критерия оптимизации для повышения качества электроэнергии. Каждый режим

представлен своим уравнением мощности и эквивалентным ему ортогональным разложением 3-фазного тока. Токовые составляющие уравнения несбалансированного режима (энергетические компоненты тока – ЭКТ) использованы для разработки методологии разделяющего учета потребляемой электроэнергии.

В несбалансированном режиме ПМ, кроме активной и обычной реактивной мощности, квадратично содержит мощность небаланса (мощность несимметрии нагрузки для 4-проводной схемы). Показано, что только в 3-проводной схеме при симметричном напряжении мощность небаланса и мощность пульсаций совпадают и синусоидальные ЭР характеризуются одним уравнением мощности.

Получены общие аналитические выражения для расчета параметров реактивных элементов компенсирующего устройства (КУ) при несимметричном напряжении. При несимметричном напряжении разработан новый метод оптимальной компенсации неактивных составляющих ПМ с одновременным устранением пульсаций ММ в цепи источника. Разработанный метод компенсации эффективно работает, даже если несимметрия напряжения выше предельно допустимой. Метод компенсации обеспечивает электроснабжение с постоянной ММ, которая равна активной мощности исходного режима при гарантированном коэффициенте мощности (который зависит только от степени несимметрии напряжения). Оптимальность предложенного метода доказана методом множителей Лагранжа.

На основе оценки и расчета составляющих уравнения мощности несбалансированного режима разработана методология расчета потерь по выборке измерений. Расчет по выборкам текущих измерений типового нормального режима многоэтажного объекта, предоставленной АК «Харьковоблэнерго», показал, что потери, обусловленные мощностью небаланса (от несимметрии нагрузки) $\approx 20\%$, существенно превышают потери реактивной мощности $\square 6\%$.

Показано, что при симметричном напряжении все компоненты уравнения мощности несбалансированного режима можно выразить через комплексные мощности фаз. Это позволило разработать методологию и методику аналитического расчета дополнительных потерь, как от несимметрии активно-реактивных элементов, так и от симметрии реактивных элементов подключаемой нагрузки на этапе проектирования.

Сформулированы и обоснованы предложения политики повышения качества поставки и потребления электроэнергии в 3-фазной сети, сочетающие установку поставщиком в каждой точке подключения потребителя счетчика, измеряющего каждую ЭКТ, заключение публичного договора, в котором предусмотрена оплата каждой ЭКТ по своему тарифу, установки потребителем КУ, применение компенсации неактивных составляющих ПМ на каждом уровне для уменьшения групповых потерь в сетях поставщика. Предложенная политика позволит учесть разную степень влияния ЭКТ на качество электроэнергии и обеспечит потребителю выбор выгодного для него способа потребления электроэнергии, стимулирует установку КУ, а поставщику обеспечит надежную методологию повышения качества электроэнергии в рамках несимметрии нагрузки и напряжения.

Ключевые слова: система электроснабжения трехфазная, компенсация реактивной мощности, качество электроснабжения, структура и схемы электроснабжения, математическое моделирование электроэнергетических процессов, составляющие полной мощности, векторная мгновенная мощность, несбалансированный режим, уравнение мощностей, активный ток, несимметричная нагрузка, несимметричное напряжение.

Sirotin Yu. A. Compensation and account of reactive power in electrical systems with asymmetrical modes. – Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree in Engineering Sciences by specialty 05.09.03 – Electrical Engineering Complexes and Systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2015.

The dissertation is devoted an important scientific and technical issues to improve the power quality of supply and consumption (SC) in three-phase networks through further development of the power theory, development of methods and ways of compensation, proposals for the accounting and payment of the inactive components of the apparent power (AP). A generalized mathematical model (GMM) of electric power processes (EPP) in a 3-phase SC scheme was developed. The model of 3-wire circuit is provided by a special (0-balanced) mode of the model 4-wire circuit. The developed GMM classifies the SC modes using the vectorial instantaneous power (IP) and summarizes the class of models used in the theory of IP.

For sinusoidal mode with asymmetric voltage the refines vectorial mathematical model (VMV) 3-phasors (complex rms vectors) was created. The analytical expressions for the integral characteristics of the classified modes are founded and their relationship with standard IP and vectorial IP are established. With asymmetrical voltage and asymmetrical loading a sinusoidal mode can be both unbalanced and pulsed. Each mode is represented by its power equation and the equivalent orthogonal decomposition of the 3-phase current. Both decompositions are used to create the optimal mode of SC with a constant IP at asymmetrical voltage. The proposed compensator provides the non-pulsed energy supply with the highest possible power factor and with the same average (active) power as the initial current.

Based on the evaluation and calculation of the power equation components of a unbalanced mode was developed a methodology for calculating the loss of the measuring selection. A methodology and technique of analytical calculation of additional losses on the passport data of the connected electrical equipment was proposed.

Formulated and proved offers on differential measurement and payment of the energy components of AP will stimulate consumer sets the compensator, and provide a reliable methodology for improving the quality of SC (within unbalance loading and voltage).

Key words: three-phase power supply system, reactive power compensation, power quality, structure and power supply circuit, mathematical modeling of the electric power processes, components of the apparent power, vectorial instantaneous power, unbalanced mode, power equations, active current, asymmetrical loading and voltages.



Відповідальний за випуск
д.т.н. проф. кафедри автоматизація енергосистем НТУ “ХПІ”
Сендерович Г.А.

Підписано до друку 12.03.2015 р. Формат 60x90/16.

Гарнітура Times New Roman. Папір офсетн.

Друк – різнограф. Ум. друк. арк. 1,9

Наклад 100 прим. Замовлення № 066844

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРИНТ»
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
ЄДРПОУ 31235131 від 19.12.2000 р.
