

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

БЕДЕРАК ЯРОСЛАВ СЕМЕНОВИЧ

УДК 621.316.176

**Оптимізація перетікань реактивної потужності
в системах електропостачання промислових підприємств
з урахуванням якості електроенергії**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, доцент

Волошко Анатолій Васильович,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ,

професор кафедри електропостачання Інституту
енергозбереження та енергоменеджменту

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

Тугай Юрій Іванович,

Інститут електродинаміки Національної академії
наук України, м. Київ,

завідувач відділу оптимізації систем
електропостачання

кандидат технічних наук, доцент

Буйний Роман Олександрович,

Чернігівський національний технологічний
університет, м. Чернігів,

доцент кафедри електричних систем і мереж

Захист відбудеться «30» серпня 2017 р. о 12-35 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «28» липня 2017 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради

С.Ю. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На промислових підприємствах України середньої та великої потужності розповсюджені системи електропостачання (СЕР), в яких електроприймачі живляться через силові трифазні двохобмоткові понижуючі трансформатори 220 (110) / 10 (6) кВ з розщепленими обмотками та здвоєні струмообмежувальні реактори на напругу 10 (6) кВ. Межа балансової належності (МБН) таких промислових підприємств з енергопостачальною організацією знаходиться на стороні вищої напруги силових трансформаторів, а прилади розрахункового обліку електроенергії часто розташовані на стороні низької напруги. В таких СЕР спостерігається при наявності різнохарактерного навантаження завищення обсягів перетікань реактивної потужності (РП), які підлягають оплаті згідно з вимогами нормативних документів. Забезпечити достовірні розрахунки можливо або шляхом встановлення приладів обліку на стороні вищої напруги (що неекономічно), або шляхом розробки методу розрахунку перетікань РП, використовуючи дані електроспоживання, зібрані автоматизованими системами обліку електроенергії в режимі реального часу. Ці дані повинні підлягати статистичному аналізу, який забезпечує їх імовірнісну оцінку. Плата за перетікання РП стимулює споживачів до встановлення компенсуючих пристроїв. Але надійна робота компенсуючих пристроїв можлива лише за умови надійного їх захисту від виникнення резонансних явищ при наявності в мережі джерел вищих гармонік (ВГ).

Суттєвий вклад в удосконалення методів розрахунку перетікань РП і режимів роботи компенсуючих пристроїв в умовах низької якості напруги внесли роботи науковців: М.А. Денисенка, А.В. Праховника, І.В. Жежеленка, А.К. Шидловського, Ю.А. Фокіна, В.Г. Кузнєцова, Ю.І. Тугая, Е.Г. Курінного, А.В. Волошка та інших вчених.

Разом з цим, покращення функціонування компенсуючих пристроїв та забезпечення достовірного розрахунку перетікань РП в системах електропостачання промислових підприємств з наступною оптимізацією перетікань, у яких МБН з енергопостачальною організацією знаходиться на стороні вищої напруги силових трансформаторів, а прилади розрахункового обліку електроенергії розташовані на стороні низької напруги, є актуальним та перспективним для України напрямом наукових досліджень та розробок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електропостачання та в Науково-дослідному інституті автоматики та енергетики «Енергія» Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт «Виконання проектних робіт по модернізації та розвитку АСКОВЕ ПАТ «Хмельницькобленерго» на межі з учасниками ОРЕ» та «Виконання проектно-кошторисної документації на інтегровану АСДТУ та АСКОВЕ ПАТ «Хмельницькобленерго» (ПАТ «Хмельницькобленерго», м. Хмельницький), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є подальший розвиток методів розрахунку та оптимізації перетікань РП, розрахунку режиму роботи компенсуючих пристроїв у СЕП промислових підприємств з урахуванням якості електроенергії.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан методів розрахунку перетікань РП та режимів роботи компенсуючих пристроїв з метою підвищення їх ефективності;
2. Розробити метод розрахунку перетікань РП в режимі реального часу в СЕП зі складною структурою промислових підприємств у випадку, коли облік електроенергії здійснюється на стороні низької напруги (НН) понижуючого силового трансформатора, а межа балансової належності (МБН) з енергопостачальною організацією знаходиться на стороні ВН;
3. Розробити засоби захисту від резонансу струмів в мережі, що складається з конденсаторної установки (КУ) та паралельно підключеного їй активно-індуктивного навантаження, в сталому режимі роботи при наявності джерел ВГ;
4. Запропонувати заходи та засоби захисту КУ, підключених до мережі, де є джерела ВГ, для запобігання їх відключення в момент вмикання нелінійного навантаження;
5. Вдосконалити метод проведення статистичного аналізу даних, зібраних автоматизованою системою контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ) в частині визначення інтервалів стаціонарності (ІС) та організації проведення обробки даних в режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є режими роботи систем електропостачання 10 (6) кВ, що містять вузли з асинхронним навантаженням та компенсуючими пристроями.

Предметом дослідження є методи розрахунку перетікань реактивної потужності та режиму роботи компенсуючих пристроїв в системах електропостачання напругою 10 (6) кВ.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базуються на використанні методів розрахунку електричних кіл змінного струму, техніки високих напруг, математичної статистики. Для розрахунку перетікань РП в СЕП для випадку відсутності збігу номінальної напруги на межі балансової належності з енергопостачальною організацією та на місцях встановлення приладів обліку застосовувався ітераційний метод розрахунку режиму роботи електричної мережі.

Математична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення (пакетів Matlab, Microsoft Excel). Надійність розробки забезпечена коректним використанням методів дослідження, підтверджена експериментальними дослідженнями та промисловим впровадженням.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено метод розрахунку перетікань РП у СЕП з різнохарактерним навантаженням при відсутності збігу номінальної напруги на межі балансової належності та місцях встановлення приладів обліку, який ґрунтується на визначенні відносних n - хвилинних значень активної та реактивної потужності та дозволяє підвищити точність та обґрунтованість розрахунків з енергопостачальною організацією за перетікання РП;

- отримав подальший розвиток метод розрахунку режиму роботи мережі з КУ, підключеної паралельно активно-індуктивному навантаженню при наявності джерел ВГ, який полягає в визначенні імпедансу та резонансної частоти в режимі реального часу, що дозволило вдосконалити захист електричної мережі від резонансних явищ;

- удосконалено метод визначення еквівалентного індуктивного опору асинхронних електродвигунів (АД) в режимі реального часу за рахунок обробки даних автоматизованих систем обліку електроенергії, що дозволяє використати значення його для розрахунку сталого режиму роботи електроустановок;

- отримав подальший розвиток метод проведення статистичного аналізу електричних навантажень в режимі реального часу, який базується на визначенні умов одержання їх інтервалів стаціонарності, що дозволило зменшити кількість інтервалів стаціонарності та спростити подальші розрахунки.

Практичне значення отриманих результатів в галузі електричної інженерії полягає у підвищенні енергоефективності роботи пристроїв компенсації РП та розробці заходів з уникання резонансних явищ у СЕП з компенсуючими пристроями напругою 10 (6) кВ. Розроблена методика розрахунку перетікань РП для випадку відсутності напруги на межі балансової належності та місцях підключення приладів розрахункового обліку електроенергії використана для створення програми у складі АСКОЕ ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), яка застосовується з 2007 року для комерційних розрахунків за перетікання РП між ПАТ «АЗОТ» та ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси). Удосконалена в роботі послідовність статистичного аналізу даних ЕН застосовується при виконанні проектів реконструкції промислових підприємств проектним інститутом ТОВ «Промелектропроект» (м. Київ) для одержання функції та закону розподілу, найбільшого значення активного та реактивного електричних навантажень. Результати дисертаційної роботи використані для розробки спеціального програмного забезпечення, що застосовується ТОВ «ТЕССА» (м. Харків) при проведенні обстеження електроприймачів промислових підприємств.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення дисертаційної роботи здобувачем отримано самостійно. Серед них: розробка методу розрахунку перетікань РП при відсутності збігу номінальної напруги на МБН та на місцях установки приладів обліку, удосконалення методу розрахунку режиму роботи компенсуючих пристроїв з урахуванням низької якості електроенергії; розробка заходів з уникнення резонансних явищ в мережі з КУ під час пуску нелінійного навантаження; вдосконалення послідовності проведення статистичного аналізу значень активного та реактивного електричного навантаження, яка ґрунтується на застосуванні методів теорії ймовірностей та математичної статистики; розробка методу визначення кількості працюючих АД в групі однотипних.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення, наукові й практичні результати дисертаційної роботи доповідалися на: II Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект-2013 (результати, проблеми, перспективи)» (м. Черкаси, 2013), XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2013), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Техника и технология: новые перспективы развития»

(м. Москва, 2012 р.), XXII Заочній науково-практичній конференції Research Journal of International Studies (м. Москва, 2013), Міжнародній конференції «Техніка і технологія. Обговорення сучасної науки. Inżynieria i technologia. Priorytetowe obszary badawcze: od teorii do praktyki» (Польща, м. Люблін, 2016), щорічній науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 2014).

Публікації. Основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковані у 28 друкованих працях, з них: 1 монографія (у співавторстві), 12 статей у наукових виданнях України (9 – у міжнародних наукометричних базах), 2 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 4 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 210 сторінок тексту, який включає: 30 рисунків за текстом та 3 – на 3 окремих сторінках, 19 таблиць за текстом та 4 таблиці на 6 окремих сторінках, бібліографічний список джерел з 151 найменування на 17 сторінках, 8 додатків на 43 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень, наведено методи виконання досліджень, показано наукову новизну та практичне значення отриманих в дисертації результатів, указано особистий внесок здобувача, наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** проаналізовані однолінійні схеми підстанцій у підприємств середньої та великої потужності в Україні. Визначено, що в промисловості України підприємства середньої та великої потужності під'єднані до енергосистеми за допомогою силових понижуючих двохобмоткових трифазних трансформаторів з розщепленими обмотками та здвоєних струмообмежувальних реакторів. Такі СЕП забезпечують електроприймачів електроенергією при найменших втратах потужності та енергії. Виконані теоретичні дослідження довели, що в таких системах спостерігається завищення оплати за перетікання РП, що впливає на ефективність застосування компенсуючих пристроїв. Підключення компенсуючих пристроїв паралельно асинхронному навантаженню при наявності джерел ВГ у мережі може призвести до виникнення аварійних явищ у мережі.

Відмічено, що для підвищення якості електропостачання нагальною є розробка методу розрахунку перетікань РП в СЕП з різнохарактерним навантаженням при відсутності збігу номінальної напруги на МБН та на місцях підключення приладів обліку за допомогою наявних поточних облікових даних електроспоживання, зібраних АСКОЕ з наступною оптимізацією величини перетікань РП.

У **другому розділі** отримали подальший розвиток методи визначення перетікань РП в СЕП для випадку відсутності збігу напруги на МБН та на місцях встановлення приладів обліку; режиму роботи конденсаторних установок (КУ) за низької якості електроенергії.

Для розрахунку перетікань РП в СЕП визначаються фактичні режимні характеристики (величини перетікань і втрат електроенергії) в умовах збереження еквівалентності комерційних показників розрахункового періоду і обліку зміни фактичних навантажень за відповідними графіками.

Відзначено, що перш ніж розпочати корекцію графіків електричних навантажень, одержаних з бази даних автоматизованих систем обліку електроенергії, доцільно розв'язати такі проблемні ситуації перед проведенням розрахунків перетікань РП в СЕП:

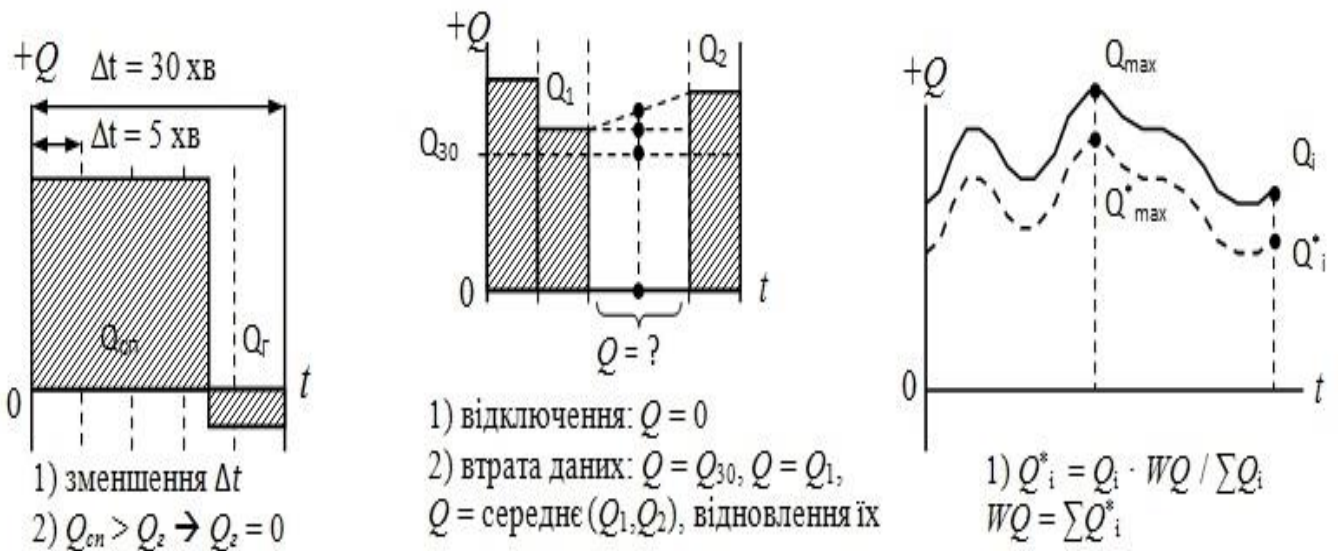
1). Наявність одночасних показань споживання Q_{cn} й генерації реактивної потужності Q_g за даними графіків навантажень. Вирішена проблема шляхом зменшення інтервалу опитування Δt (наприклад, з 30 хвилин до 5 хвилин);

2). Відсутність даних графіків навантажень для деякої кількості інтервалів часу. Дані графіка навантаження за такими оцінками часу приймаються рівними нулю, або замінюються значенням графіка з більшим періодом Δt ;

3). Сума значень потужності на інтервалах опитування на розрахунковому інтервалі часу повинна дорівнювати вимірюваному значенню споживання електроенергії. Ця вимога виконується шляхом перерахунку всіх значень графіка навантажень із урахуванням заданого значення споживання електроенергії;

4). Синхронізація міток часу кожного графіка навантажень. Для півгодинних графіків навантажень ця ситуація вирішується на апаратному рівні, однак більшість автоматизованих систем обліку електроенергії мають можливість використовувати графіки з меншим періодом Δt , наприклад, 5-хвилинні графіки. У цьому випадку мітки часу різних точок обліку не синхронізовані, і ця ситуація вирішена шляхом введення відносних графіків.

Графічно шляхи розв'язання проблемних ситуацій 1) ÷ 3) наведені на рис. 1 та позначені арабськими цифрами.



а) одночасні показники Q_{cn} та Q_g б) відсутність даних вимірювань в) сума значень Q_i повинна дорівнювати WQ

Рисунок 1 – Коригування графіків електричних навантажень, оброблених в автоматизованих системах обліку електроенергії

Метод розрахунку перетікань РП у випадку відсутності збігу напруги на межі балансової належності та на місцях підключення приладів обліку складається з таких етапів:

1). Збір вихідних даних (параметри завантаження трансформаторів; розрахункові значення споживання та генерації активної та реактивної електроенергії, значення напруги у вузлі електричної мережі, де встановлений силовий трансформатор; каталожні дані силового трансформатора; положення регулюючого відгалуження обмотки вищої напруги) для розрахунку перетікань;

2). Розрахунок параметрів схем заміщення елементів мережі;

3). Введення часових меж розрахункового періоду Δt ;

4). Імпорт n -хвилинних активної P , спожитої реактивної $Q_{сп}$, генерованої реактивної $Q_{г}$ потужностей, показників лічильника за розрахунковий період (годину) зі значеннями споживання активної енергії WP , спожитої реактивної енергії $WQ_{сп}$, генерованої реактивної енергії $WQ_{г}$, одержаними з бази даних автоматизованих систем обліку електроенергії;

5). Перевірка наявності повноти та достовірності даних за n -хвилинні інтервали опитування приладів обліку;

6). Проведення вирівнювання n -хвилинних інтервалів часу приладів обліку та нормування n -хвилинних відносних графіків активної $P^{\%}$, спожитої реактивної $Q_{сп}^{\%}$, генерованої реактивної $Q_{г}^{\%}$ потужностей (рис. 2);



Рисунок 2 – Побудова відносного n -хвилинного графіку активної та реактивної потужності (при значенні $n = 5$ хвилин)

7). Розрахунок відносних значень графіка навантаження та скоригованого максимуму активних та реактивних навантажень;

8). Коригування даних електричних навантажень;

9). Прив'язка для визначення перетікань потужностей по елементах устаткування (до межі балансової належності) скоригованих навантажень до розрахункової схеми електричної мережі, що містить параметри устаткування (трансформатори, реактори, комутаційні апарати) і конфігурацію зв'язку вказаних елементів між собою;

10). Додавання до скоригованих величин електричних навантажень розрахункових втрат в елементах технологічної мережі споживача (лінії, трансформатори, реактори), які розраховуються за відповідні п'ятихвилинні проміжки часу (визначення $P_{бj}, Q_{спбj}, Q_{гбj}$ – балансних значень активної потужності,

реактивної потужності споживання та генерації на межі балансової належності на j -му інтервалі опитування відповідно);

11). Одержання значень перетікань активної $WP_{\bar{o}}$, спожитої $WQ_{\text{спб}}$ або генерованої реактивної $WQ_{\text{гб}}$ електроенергії в СЕП на МБН в кожній точці обліку за формулами:

$$WP_{\bar{o}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_1^{t_{\Pi}} P_{\bar{o}j}; \quad WQ_{\text{спб}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_1^{t_{\Pi}} Q_{\text{спб}j}; \quad WQ_{\text{гб}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_1^{t_{\Pi}} Q_{\text{гб}j},$$

де K – кількість n -хвилинних інтервалів у розрахунковому періоді t_{Π} (наприклад, година);

12). Розрахунок балансового значення споживання активної (реактивної) електроенергії за першу годину доби, що розглядається, шляхом додавання значень перетікань електроенергії в СЕП на межі балансової належності в кожній точці обліку з відповідним значенням втрат активної (реактивної) електроенергії в силових трансформаторах;

13). Розрахунок за п. п. 5÷12 балансового значення споживання активної електроенергії та споживання (або генерації) реактивної електроенергії за кожну наступну годину в добі;

14). Формування протоколу розрахунку за добу, або за інший розрахунковий період часу (місяць, наприклад).

Визначено, що впровадження розробленого методу розрахунку перетікань РП в

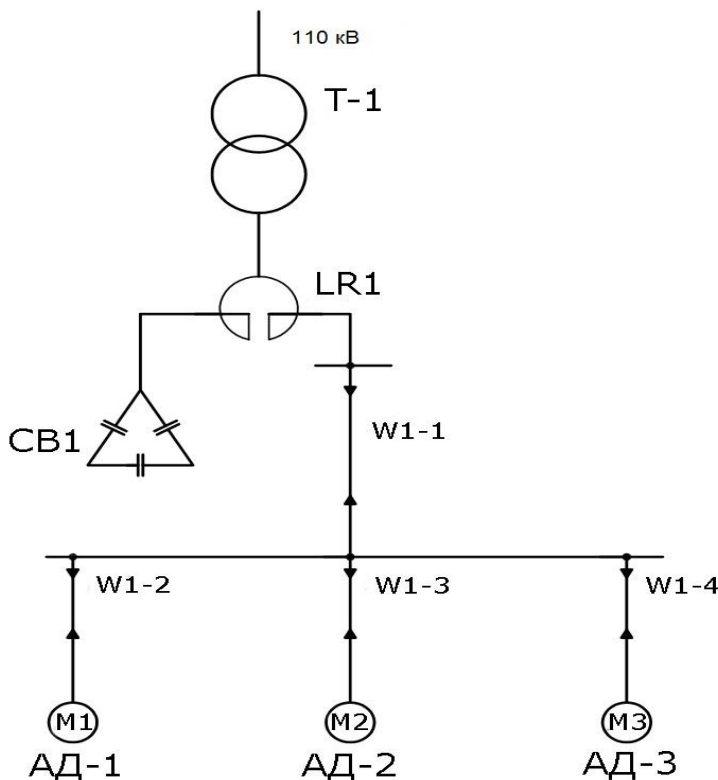


Рисунок 3 – Однолінійна схема підключення КУ до шин 6 кВ ГПП

умовах відсутності збігу напруги на межі балансової належності та місцях підключення розрахункового обліку електроенергії на 30÷40 % зменшує оплату за перетікання РП та заохочує споживачів до підтримання коефіцієнту потужності в СЕП до оптимальних значень шляхом установки відповідних компенсуючих пристроїв. При відсутності синхронних електродвигунів такими пристроями є КУ напругою 0,4 ÷ 10 кВ (рис. 3). При наявності в мережі промислових підприємств джерел ВГ можливий резонанс струму. Резонансний контур складається з активно-індуктивного навантаження з джерелом ВГ, підключеного до однієї вітки реактора, та КУ, підключеної до його другої вітки.

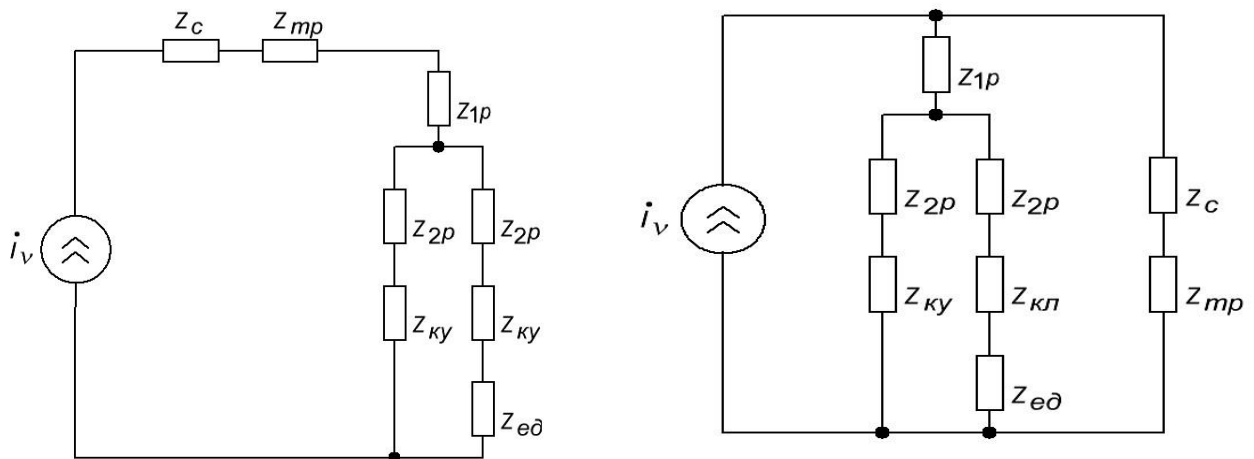
Для захисту від резонансних явищ узагальнено метод розрахунку режиму роботи мережі з КУ в несинусоїдальному режимі, що полягає в розрахунку як резонансної частоти в контурі, так і імпедансно-частотної характеристики (залежності модуля повного опору від номеру гармоніки) на усіх непарних гармоніках, кратних 50 Гц, у мережі з джерелами ВГ на підставі застосування параметрів електроспоживання в режимі реального часу.

Резонансна частота визначається як

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{екв} C_{екв}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{екв1}^2 - \frac{L_{екв}}{C_{екв}}}{R_{екв2}^2 - \frac{L_{екв}}{C_{екв}}}}, \quad (1)$$

де $R_{екв1}$ – активний опір вітки, що містить конденсаторну установку; $R_{екв2}$ – опір вітки, що складається з активно-індуктивного навантаження; $L_{екв}$ – еквівалентна індуктивність всього контуру; $C_{екв}$ – еквівалентна ємність його. Опори елементів СЕП визначаються на підвищених частотах за загальновідомими формулами з урахуванням коефіцієнту, що враховує вплив витиснення струму в провідниках на індуктивні опори елементів (для діапазону частот 100-1950 Гц), номера ВГ, залежності скочання АД від номера вищої гармоніки v .

Схема заміщення мережі з КУ та джерелом ВГ (рис. 3) наведена на рис. 4.



а) джерело ВГ зовні мережі з КУ

б) джерело ВГ всередині мережі з КУ

Рисунок 4 – Схема заміщення мережі з КУ та джерелом ВГ,

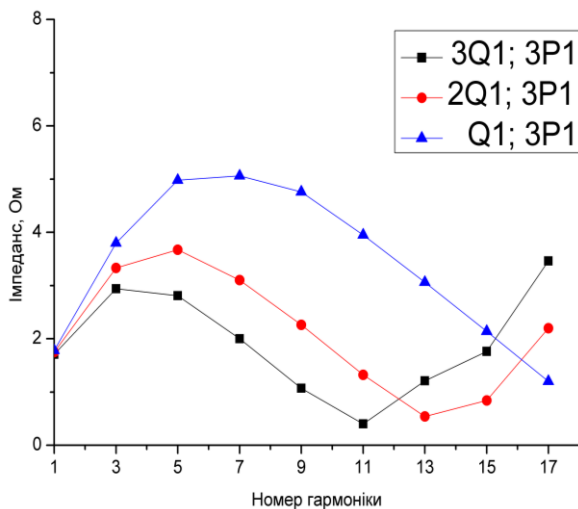
де I_v – струм v -ї гармоніки; Z_c – повний опір системи; Z_{mp} – повний опір силового трансформатора; Z_{1p} та Z_{2p} – повні опори загальної вітки реактора та однієї з двох віток, що відходять, зведеного струмообмежувального реактора відповідно; $Z_{ку}$ – повний опір КУ; $Z_{ед}$ – повний опір еквівалентного АД; $Z_{кл}$ – повний опір кабельних ліній від головної понижувальної підстанції до АД.

При проведенні розрахунку режиму роботи КУ в несинусоїдальному режимі введений спеціальний коефіцієнт K , який дорівнює відношенню номінальної РП КУ $Q_{КУ}$, включеної в роботу, до значення номінальної активної потужності АД $P_{АД}$

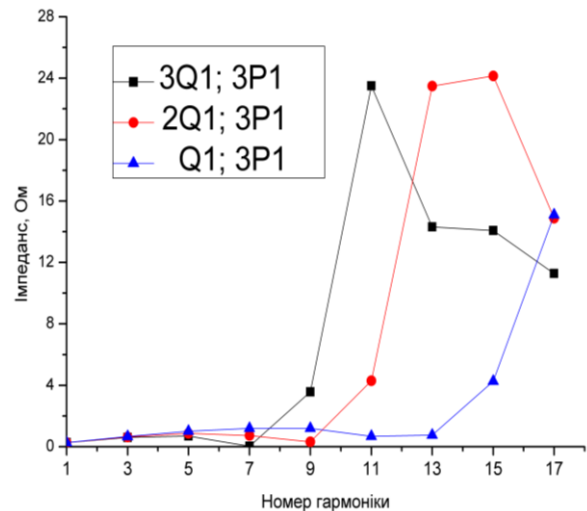
$$K = \frac{Q_{КУ}}{P_{АД}}. \quad (2)$$

Вищевказаний коефіцієнт, розрахований за формулою (2), використовується для порівняння значень імпедансу та резонансної частоти в мережі при різних потужностях КУ та включених в роботу АД.

У промисловості фактичне значення як активної потужності включених АД, так і РП КУ може коливатися в широких межах. Це приводить до зміни значення резонансної частоти в контурі та повного опору в контурі (імпедансу). Проведені розрахунки свідчать, що якщо джерело ВГ знаходиться всередині мережі, то резонансна частота при однаковому номері гармоніки значно більша, ніж коли джерело ВГ знаходиться за межами її. Імпедансно-частотні характеристики при різних місцях підключення джерел ВГ та при постійній потужності трифазних асинхронних електродвигунів в мережі наведені на рис. 5.



а) джерело ВГ зовні мережі з КУ



б) джерело ВГ всередині мережі з КУ

Рисунок 5 – Залежність імпедансно-частотної характеристики від номера гармоніки при різних ємностях КУ при постійній потужності еквівалентного АД

Доведено, що при підключенні джерела ВГ зовні мережі, значення імпедансу значно менше, ніж імпеданс кола з джерелом ВГ, що знаходиться всередині мережі. Це свідчить про більшу небезпеку підключення джерела ВГ зовні мережі. При однаковій потужності АД при зростанні потужності включених КУ резонансна частота в контурі зменшується (рис. 5). При однаковій РП КУ чим більша потужність працюючих АД, тим більший імпеданс мережі. При однаковій потужності КУ при зростанні потужності включених в мережу АД резонансна частота збільшується.

У мережі, де відсутня інформація про кількість включених АД, ліній електропередачі від підстанції до них, існує проблема визначення кількості працюючих АД у групі однотипних. Якщо лічильник встановлений на ввіді на підстанцію, то однозначно визначити кількість працюючих однотипних АД неможливо, бо потужність одиничного двигуна коливається в межах від 25 до 100 відсотків від номінальної. Тому необхідно обрати таке значення потужності АД, при якому для будь-якого типу двигуна він буде вважатися включеним. Струм неробочого ходу АД $I_{нх}$ розраховується за формулою

$$I_{нх} = I_{ном} \left(\sin \varphi_{ном} - \frac{\cos \varphi_{ном}}{b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}} \right), \quad (3)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна; $\cos \varphi_{ном}$ – номінальний коефіцієнт потужності; $b_{ном}$ – відношення максимального обертаючого моменту до номінального на валу АД.

Розрахунки, виконані за каталожними даними ($\cos \varphi_{ном} = 0,8 \dots 0,92$; $b_{ном} = 2 \dots 2,7$), за формулою (2) свідчать, що мінімальне значення $I_{нх}$ знаходиться в інтервалі 25 % ÷ 40 % від номінального струму електродвигуна. Тому мінімальна робоча потужність електродвигуна обрана в 25 % від номінальної потужності.

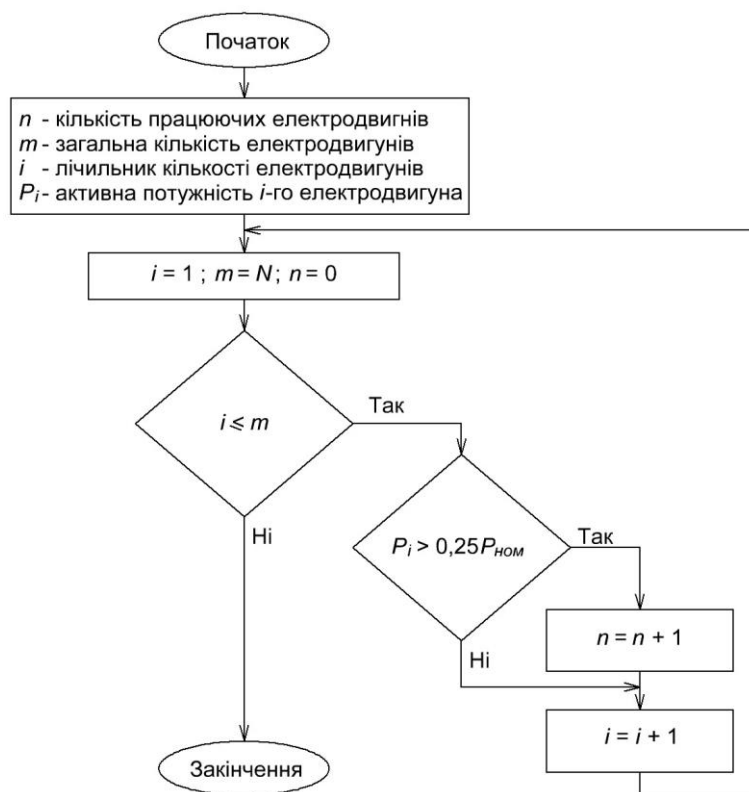


Рисунок 6 – Алгоритм програми визначення кількості включених АД за обліковими даними

Розраховується кількість включених АД шляхом установки електронних лічильників електроенергії на кожне їх приєднання, підключення лічильників до автоматизованої системи обліку електроенергії і розробки спеціальної підпрограми (рис. 6). Лічильник програми розпочинає відлік з 0. Коли навантаження на першому електродвигуні перевищує $0,25P_{ном}$ електродвигуна, то він вважається включеним. Аналогічна процедура відбувається з кожним наступним електродвигуном. Коли $i = m$, то процедура закінчує свою роботу і на виході одержується розрахована кількість працюючих електродвигунів у групі однотипних.

При експлуатації компенсуючих пристроїв доцільно

користуватися критерієм мінімуму втрат активної потужності ΔP . В цьому випадку ставиться наступна екстремальна задача

$$\Delta P = (Q_{спб} - Q_{кп}) \frac{R}{U^2} \rightarrow \min,$$

де $Q_{кп}$ – РП компенсуючих пристроїв, що включена в роботу, R – еквівалентний активний опір в точці обліку, який розраховується за схемою заміщення мережі, U – значення напруги в точці обліку. Запропоновані критерії оптимізації та обмеження потужності компенсуючих пристроїв для кожного джерела РП та їх комбінацій, що дозволяє досягнути мінімального значення перетікань спожитої $Q_{спб}$ та генерованої $Q_{гб}$ РП на МБН в будь-який момент часу на промисловому підприємстві (табл. 1).

Таблиця 1 – Критерії оптимізації та обмеження на змінні цільової функції в точці обліку (після проведення розрахунків коефіцієнту запасу по нарузі $K_{зап}$ вузла навантаження та несинусоїдального режиму мережі на кожній з непарних ВГ, кратних 50 Гц)

| Види джерел РП | Наявність споживання або генерації РП на МБН | |
|---|--|--|
| | $Q_{спб}=0. Q_{гб}>0$ | $Q_{спб}>0. Q_{гб}=0$ |
| Тільки КУ ($Q_{ку ном}$ – номінальна РП усіх КУ в точці обліку) $Q_{ку}^{опт}$ – оптимальна РП КУ | <ol style="list-style-type: none"> $Q_{гб} = Q'_{ку}$, де $Q'_{ку}$ – потужність КУ, яку необхідно вимкнути. $Q_{ку}^{опт} \approx Q_{ку ном} - Q'_{ку}$. $Q_{ку}^{опт} < Q_{крит}$. <p>$Q_{рез}$ – РП КУ, при якій в СЕП виникає резонанс струму на одній з непарних ВГ, кратних 50 Гц. $Q_{крит}$ – критична РП КУ, при якій $K_{зап} < 15\%$.</p> | <ol style="list-style-type: none"> $Q_{ку}^{опт} \approx Q_{спб}$. $Q_{ку}^{опт} \leq Q_{ку ном}$. $Q_{ку}^{опт} < Q_{крит}$. $Q_{ку}^{опт} \neq Q_{рез}$. $\delta U \leq \delta U_{доп}^B$. ($\delta U_{доп}^B$ – верхня межа допустимого відхилення напруги) |
| КУ та синхронні двигуни | <ol style="list-style-type: none"> Оптимальна РП синхронних двигунів (СД) $Q_{сд}^{опт} = P_{сд екв} \cdot \text{tg}(\arccos \varphi)$, де $P_{сд екв}$ – номінальна еквівалентна активна потужність СД в точці обліку; $\cos \varphi$ (ємнісний) – значення коефіцієнту потужності СД. Оптимальна потужність КУ $Q_{ку}^{опт} = 0$. | <ol style="list-style-type: none"> $Q_{сд}^{опт} = P_{сд екв} \cdot \text{tg}(\arccos \varphi)$. $Q_{ку}^{опт} \approx Q_{спб} - Q_{сд}^{опт}$. $Q_{ку}^{опт} \leq Q_{ку ном}$. $Q_{ку}^{опт} < Q_{крит}$. $Q_{ку}^{опт} \neq Q_{рез}$. $\delta U \leq \delta U_{доп}^B$. |
| Тільки синхронні двигуни | <ol style="list-style-type: none"> Оптимальне значення генерації РП $Q_{гб}^{опт} = Q_{сд}^{опт} = P_{сд екв} \cdot \text{tg}(\arccos \varphi)$. | <ol style="list-style-type: none"> $Q_{сд}^{опт} = P_{сд екв} \cdot \text{tg}(\arccos \varphi)$. $Q_{гб}^{опт} = 0$. |

У третьому розділі показано, що для вирішення завдань достовірного розрахунку перетікань РП та запобігання резонансним явищам необхідно

користуватися даними електроспоживання, зібраними електронними лічильниками та переданими в автоматизовані системи обліку електроенергії.

Обробку даних електричних навантажень на будь-якому приєднанні споживача пропонується здійснювати у такій послідовності:

1. Дискретизація випадкового процесу за часом;
2. Перевірка даних вимірювання на відсутність грубих промахів;
3. Відновлення втрачених облікових даних;
4. Створення масиву даних по кожній точці обліку;
5. Визначення статистичних характеристик (показників описувальної статистики);
6. Аналіз випадкового процесу з розрахунком та апроксимацією нормованої авто- та взаємнокореляційної функції;
7. Знаходження функції та закону розподілу випадкового процесу електроспоживання.
8. Оперативне прогнозування даних навантажень на період упередження, що дорівнює декільком періодам інтеграції.

Для визначення умов проведення статистичного аналізу виконані дослідження на основі зібраного ансамблю реалізацій електричних навантажень з підстанції насосної станції хімічного підприємства. З бази даних АСКОЕ п'ятнадцятихвилинні значення активної та реактивної потужності $P(t)$ і $Q(t)$ та миттєвого значення напруги U на цьому ж часовому інтервалі з обох вводів 10 кВ підстанції експортуються в програму Microsoft Excel. Оцінка ІС здійснюється за таких значень відхилення оцінок параметрів розподілу від їх середнього значення усередині інтервалу стаціонарності ε : 0,03; 0,035; 0,04; 0,045; 0,05. Кількість n ІС та максимальна тривалість $\Delta t_{\mu, \max}$ ІС активного електричного навантаження за різних значень величини ε наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Кількість n інтервалів стаціонарності та максимальне значення їх тривалості межі $\Delta t_{\mu, \max}$ для активного електричного навантаження за різних значень величини ε

| Значення ε | Перший ввід підстанції | | Другий ввід підстанції | |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | n , шт | Δt_{\max} , хв. | n , шт | Δt_{\max} , хв. |
| 0,03 | 29 | 120 | 32 | 90 |
| 0,035 | 19 | 135 | 30 | 120 |
| 0,04 | 15 | 135 | 23 | 195 |
| 0,045 | 15 | 240 | 18 | 210 |
| 0,05 | 12 | 270 | 16 | 210 |

Використання максимального значення $\varepsilon=0,05$ дозволяє зменшити кількість інтервалів стаціонарності, точніше побудувати графік нормованої автокореляційної функції та провести апроксимацію її.

У **четвертому розділі** за методологією розрахунку перетікань активної та реактивної потужності в СЕП промислових підприємствах, в яких межа балансової належності знаходиться на стороні вищої напруги силових трансформаторів, а

прилади обліку знаходяться на стороні низької напруги, розроблено алгоритм програми з розрахунку перетікань РП, за яким створений програмний продукт.

Програма працює за ретроспективними даними графіків навантажень розрахункового періоду. Балансна формула на i -му приєднанні має вигляд

$$WQ_{\text{сп (НН)}} - WQ_{\text{Г (НН)}} + \Delta WQ_{\text{тр}} + \Delta WQ_{\text{р}} - WQ_{\text{сп (МБН)}} + WQ_{\text{Г (МБН)}} = 0,$$

де $WQ_{\text{сп (НН)}}$ – споживання реактивної електроенергії, кВ·Ар·год; $WQ_{\text{Г (НН)}}$ – генерація реактивної електроенергії, кВ·Ар·год; $\Delta WQ_{\text{тр}}$ – втрати реактивної електроенергії в силовому трансформаторі, кВ·Ар·год; $WQ_{\text{сп (МБН)}}$ – споживання реактивної електроенергії на межі балансової належності, кВ·Ар·год; $WQ_{\text{Г (МБН)}}$ – генерація реактивної електроенергії на межі балансової належності, кВ·Ар·год.

Програма розрахунку перетікань РП в складі автоматизованої системи обліку електроенергії з 2007 року використовується для комерційних розрахунків за перетікання РП між ПАТ «АЗОТ» та ПАТ «Черкасиобленерго», що дозволило знизити на 30 ÷ 50 % оплату промислового підприємства за перетікання РП.

На основі проведеного розрахунку резонансної частоти в мережі, що складається з КУ та паралельно їй підключеного активно-індуктивного навантаження, при наявності джерела ВГ розроблено алгоритм програми, яка в режимі реального часу за обліковими даними та за прогнозованими даними обліку на один-два періоди інтеграції, розраховує значення резонансної частоти $f_{\text{рез}}$, полоси пропускання Δf , добротності контуру Q та слідкує, щоб вона не наближалася до значень, що дорівнюють 150, 250, 350, 450, 550 і далі до 1950 Гц.

На промислових підприємствах зустрічається такий режим роботи КУ напругою 10 (6) та 0,4 кВ, при яких вона підключена до шин підстанції 10 (6) або до виводів НН силового трансформатора відповідно паралельно активно-індуктивному навантаженню, що містить джерело вищих гармонік. У такій мережі при вмиканні нелінійного навантаження часто відбувається вимкнення КУ за струмовим захистом внаслідок перевантаження КУ струмами ВГ внаслідок резонансу струму.

Така подія трапляється також, коли потужний синхронний двигун напругою 6 кВ вмикається паралельно КУ на ту ж саму напругу через тиристорний пристрій плавного пуску. Робота такого пристрою призводить до виникнення несинусоїдальних струмів з високим змістом вищих гармонічних складових у живильній мережі.

Осцилограма з регістратора аварійних ситуацій, встановленого на секціях шин 6 кВ головної понижувальної підстанції, на момент пуску синхронного двигуна 6 кВ через тиристорний пристрій плавного пуску, наведена на рис. 7. Резонансний контур складається з активного опору реактора і КУ, індуктивного опору віток зведеного струмообмежувального реактора і ємнісного опору КУ в одній вітці, і активного опору реактора, індуктивного опору реактора, індуктивного опору навантаження в другій вітці.

Під час пуску нелінійного навантаження КУ відключається струмовим захистом.

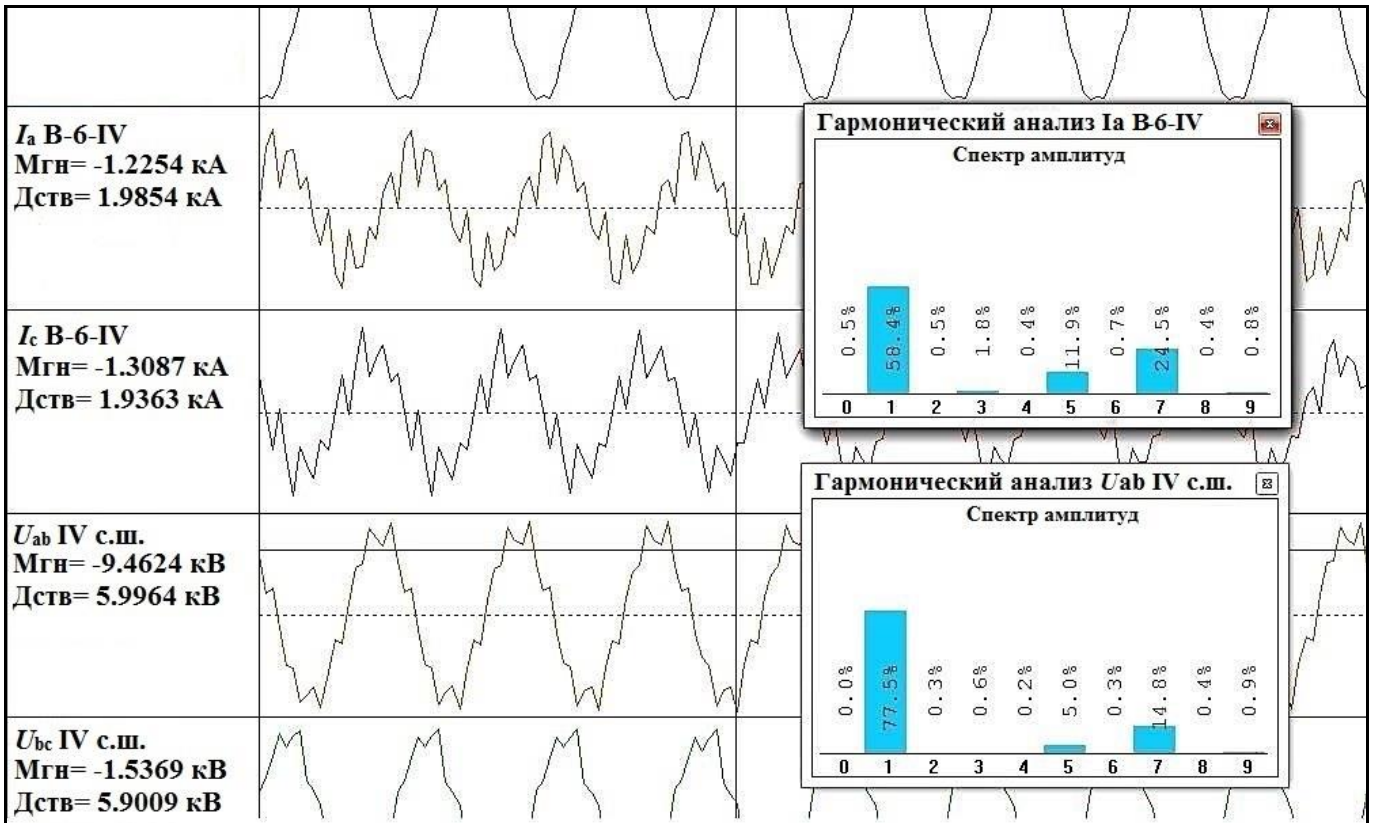


Рисунок 7 – Осцилограми струмів і напруг у момент вмикання джерела ВГ,

де I_a та I_c – фазні вторинні струми в фазах А та С вводу на IV секцію шин 6 кВ відповідно, U_{ab} та U_{bc} – лінійні вторинні напруги між фазами А та В, В і С вводу на IV секцію шин 6 кВ головної понижувальної підстанції відповідно.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що для захисту КУ від резонансу струмів, який виникає під час пуску нелінійного електричного навантаження, необхідно вимкати її вручну або автоматично до моменту включення нелінійного навантаження.

У **додатках** наведено приклади застосування розроблених у дисертаційній роботі підходів, акти впровадження основних результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язані для систем електропостачання промислових підприємств науково-прикладні задачі розрахунку фактичних значень перетікань реактивної потужності в умовах, коли межа балансової належності з електропостачальною організацією знаходиться на стороні вищої напруги двохобмоткових силових трансформаторів, а відповідні прилади обліку встановлені на стороні низької напруги; завдання запобігання резонансу струмів в мережі, що містить конденсаторну установку та активно-індуктивне навантаження при наявності джерел ВГ, що має першочергове значення для забезпечення надійності функціонування систем електропостачання.

Отримані наступні результати:

1. Обґрунтовано метод розрахунку фактичних значень перетікань реактивної потужності шляхом застосування інформаційної бази автоматизованих систем обліку електроенергії для випадку, коли межа балансової належності знаходиться на

стороні вищої напруги силових трансформаторів, а відповідні прилади обліку встановлені на стороні їх низької напруги. Впровадження методу дозволяє підвищити точність та обґрунтованість розрахунків з енергопостачальною організацією за перетікання реактивної потужності та зменшити на 30 – 40 % оплату за її перетікання.

2. Розроблений метод розрахунку резонансної частоти в режимі реального часу в системі електропостачання з різнохарактерним навантаженням за наявності джерел вищих гармонік в умовах невизначеності даних про опори елементів мережі шляхом використання значень електроспоживання (поточних та прогнозованих на декілька періодів упередження). Таким чином унеможливується збіг резонансної частоти з частотою непарних гармонік, кратних 50 Гц, та запобігається виникнення резонансних явищ в системах електропостачання промислових підприємств.

3. Обґрунтовано метод розрахунку еквівалентного індуктивного опору включених асинхронних електродвигунів в умовах відсутності інформації про їх кількість; значення еквівалентного індуктивного опору застосовується для розрахунку режиму роботи конденсаторних установок за низької якості електроенергії, періодичної складової пускового струму тощо.

4. Визначені засоби та заходи захисту мережі, що містить конденсаторну установку під час пуску нелінійного навантаження, від аварійних ситуацій внаслідок виникнення резонансу струмів у цей час, що забезпечує надійну роботу її за низької якості електроенергії.

5. Базуючись на апаратів математичної статистики, розроблена послідовність та визначені оптимальні умови проведення статистичного аналізу даних електричних навантажень, що дозволяє застосувати ці дані під час розрахунку режиму роботи компенсуючих пристроїв у режимі реального часу.

6. Позитивні результати промислового освоєння розроблених в дисертаційній роботі методів (ПАТ «АЗОТ», м. Черкаси, ТОВ «Промелектропроект», м. Київ, ТОВ «ТЕССА», м. Харків) довели їх високу технічну та економічну доцільність.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бедерак Я. С. Методы проверки схем включения счетчиков и измерительных каналов систем учета электроэнергии: Монография / Я. С. Бедерак, А. В. Волошко, Ю. А. Родин, А. В. Праховник. – Харьков: Изд-во «Форт», 2012. – 136 с. *Здобувачем вирішена проблема перевірки правильності підключення приладів обліку електроенергії на діючих приєднаннях.*

2. Бедерак Я. С. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. М. Лутчин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харків. – 2013. – Вип. 5/8 (65). – С. 19–23. *Здобувачем обґрунтована доцільність застосування узагальненого геометричного критерію, необхідного для однозначного вибору математичної моделі електроспоживання найкращої якості за рівноважними критеріями.*

3. Бедерак Я. С. Комбинированный метод восстановления учетных данных электропотребления на химических предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Лутчин Т. Н. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. – 2013. – № 2. –

С. 38–43. *Здобувачем розроблений комплект взаємно незалежних критеріїв якості при використанні регресійного методу відновлення облікових даних.*

4. Бедерак Я. С. Дослідження режиму роботи конденсаторних установок 6 (10) кВ, підключених до вітки здвоєного струмообмежувального реактора / Я. С. Бедерак, С. В. Олейнік, А. А. Шуляк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук. – 2013. – Вип. 2 (22). Частина 2. – С. 290–294. *Здобувачем проведений розрахунок режиму роботи КУ, підключеної до вітки здвоєного струмообмежувального реактора, при наскрізному режимі роботи його.*

5. Бедерак Я. С. Применение метода экспоненциального сглаживания для восстановления утерянных данных технического учета на промышленных предприятиях / Я. С. Бедерак // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2014. – №4. – С. 52–55.

6. Бедерак Я. С. Система моніторингу режимів електроспоживання промислового підприємства / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К. : НТУУ «КПІ» – 2014. – № 4. – С. 50 – 58. *Здобувачем узагальнені існуючі та розроблені нові заходи для зменшення розміру оплати за електроенергію на промислових підприємствах.*

7. Бедерак Я. С. Восстановление и оперативное прогнозирование методом Хольта электропотребления предприятий с непрерывным циклом работы / И. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Электронное моделирование. – К. – 2015. – Т. 37 (№4). – С. 119–126. *Здобувачем доведено, що при певних значеннях постійних згладжування для методу Хольта технологічний процес є стабільним.*

8. Бедерак Я. С. Оперативное прогнозирование электропотребления предприятий с непрерывным циклом работы / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин // Электронное моделирование. – К. – 2015. – Т. 37 (№6). – С. 111 – 118. *Здобувачем проведені розрахунки з відновлення та оперативного прогнозування даних електроспоживання різними методами.*

9. Bederak Ya. S. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises / D. A. Gapon, Ya.S. Bederak // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2016. – №1. – С. 56–58. *Здобувачем розроблений алгоритм дій з запобігання резонансних явищ в режимі пуску нелінійного навантаження.*

10. Бедерак Я. С. Метод автоматичного визначення кількості одночасно працюючих в групі електродвигунів / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2016. – №5. – С. 61–63. *Здобувачем розроблений алгоритм визначення кількості одночасно працюючих у групі електродвигунів.*

11. Бедерак Я. С. Застосування методів самоорганізації математичних моделей енергоспоживання для встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харків. – 2012. – №5. – С. 23–33. *Здобувачем виконано порівняння ефективності регресійного методу та методу групового урахування аргументів для побудови математичної моделі.*

12. Бедерак Я. С. Побудова багатофакторних математичних моделей енерго-

споживання на хімічному виробництві / І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харьков. – 2013. – №7. – С. 41–48.

Здобувачем проведені дослідження технологічного процесу для побудови математичної моделі енергоспоживання, з яких зроблений висновок о необхідності врахування не тільки поточних значення параметрів, але й динаміки процесу.

13. Бедерак Я. С. Електромагнітна сумісність складноструктурованих електропостачальних систем промислових підприємств / Я. С. Бедерак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2014. – №12. – С. 290–294.

14. Бедерак Я. С. Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей / Д. А. Гапон, Я. С. Бедерак // Промышленная энергетика. – М. – 2014. – №2. – С. 27–30. *Здобувачем розроблені заходи з запобігання резонансу струму в мережі з КУ під час пуску нелінійного навантаження.*

15. Бедерак Я. С. К вопросу восстановления учетных данных на химических предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю. Кудрицкий // Известия Томского политехнического университета. – Томск. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 101–107. *Здобувачем запропонований метод вибору обсягу вибірки даних електричних навантажень, який забезпечує найкращу якість відновлення їх.*

16. Бедерак Я. С. Восстановление учетных данных энергопотребления на промышленных предприятиях / А. В. Волошко, Т. Н. Лутчин, Я. С. Бедерак, А. В. Ткаченко // Материалы VII Международной научно-практической конф. «Техника и технология: новые перспективы развития», 26 ноября 2012 г. – Москва, 2012. – С. 179–188. *Здобувачем доведено, що використання вибірок даних електроспоживання з занадто великим об'ємом призводить до збільшення помилки їх відновлення.*

17. Бедерак Я. С. Побудова багатofакторних математичних моделей енергоспоживання на хімічному виробництві / І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Обчислювальний інтелект-2013 (результати, проблеми, перспективи): 2-а Міжнародна науково-технічна конф., 14-17 травня 2013 р.: тези доп. – Черкаси.– 2013. – С. 427–428. *Здобувачем обгрунтовано доцільність застосування для вибору найкращої математичної моделі методом групового урахування аргументів комплекта взаємно незалежних зовнішніх критеріїв.*

18. Бедерак Я. С. Влияние объема выборки данных электропотребления на ошибку математической модели / Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю. Кудрицкий // Международный научно-исследовательский журнал (Сборник по результатам XXII Заочной научно-практической конференции Research Journal of International Studies, 2013 г.). – Екатеринбург. – 2014. – № 1. – С. 37–40. *Здобувачем запропонований спосіб визначення оптимального обсягу вибірки даних, при якому їх відновлення буде найбільш точним.*

19. Бедерак Я. С. Алгоритм програми захисту конденсаторних установок 10 (6) кВ в електроустановках промислових підприємств від резонансу струму / Я. С. Бедерак // Техника и технология. Обсуждения современной науки «Inżynieria i technologia. Priorytetowe obszary badawcze: od teorii do praktyki», 30.05.2016 – 31.05.2016, Lublin. – 2016. – С. 86–91.

20. Бедерак Я. С. Сравнительный анализ методов расчета потерь активной электроэнергии в силовых трансформаторах / А. В. Волошко, М. Д. Банин, Я.С. Бедерак // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб. // Промелектро. – К. – 2010. – №6. – С. 36–41. *Здобувачем проведени розрахунки втрат активної електроенергії в силових трансформаторах різними методами.*

21. Бедерак Я. С. Дослідження електричних навантажень насосної станції / М. А. Денисенко, Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2012. – №4. – С. 3–11. *Здобувачем розроблена послідовність проведення статистичного аналізу значень активного та реактивного електричного навантаження.*

22. Бедерак Я. С. Дослідження закону розподілу та нормованих автокореляційних функцій насосної станції / М. А. Денисенко, Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2012. – №10. – С. 62–65. *Здобувачем проведений розрахунок впливу значення величини допустимого відхилення окремих значень оцінок параметрів розподілу від їх середнього значення усередині інтервалу стаціонарності на зменшення чи збільшення довжини його.*

23. Бедерак Я. С. Расчет реальной величины перетока реактивной электроэнергии для промышленных предприятий на основе данных АСКУЭ / Д. Б. Банин, М. Д. Банин, А. В. Дегтярев, Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – 2013. – К. – №9. – С. 16–21. *Здобувачем розроблений спосіб побудови графіків відносних електричних навантажень за певний період часу та нормування їх за тривалістю.*

24. Бедерак Я. С. Необходимость впровадження моніторингу струму та напруги з різним характером навантаження в гілках здвоєних реакторів при наявності джерел вищих гармонік / Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2013. – №8. – С. 48–51.

25. Бедерак Я. С. Усовершенствование методов восстановления учетных данных энергопотребления на промышленных предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю. Кудрицкий // Енергетика та електрифікація. – К. – 2014. – №7. – С. 28–30. *Здобувачем запропоновано обирати найкращу модель відновлення або прогнозування даних електричних навантажень, одержану регресійним методом, шляхом вибору моделі з мінімальною помилкою.*

26. Бедерак Я. С. Засоби захисту конденсаторних установок 10 (6) кВ, встановлених в одній вітці здвоєного струмообмежувального реактора, у випадку наявності підключеного до другої вітки джерела вищих гармонік, від резонансу струмів / Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2014. – №6. – С. 34–37.

27. Бедерак Я. С. Про верифікацію вимірювальної інформації в автоматизованих системах технічного обліку електроенергії / Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – К. – 2014. – №11. – С. 34–35.

28. Бедерак Я. С. Шляхи зменшення оплати за спожиту електроенергію на промислових підприємствах, де розрахункові лічильники знаходяться нижче межі балансової належності з енергопостачальною організацією / Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – К. – 2015. – № 3. – С. 10–16.

АНОТАЦІЇ

Бедерак Я.С. Оптимізація перетікань реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств з урахуванням якості електроенергії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

В дисертаційній роботі розроблений метод розрахунку фактичних значень перетікань реактивної потужності в системі електропостачання промислових підприємств шляхом застосування інформаційної бази автоматизованих систем обліку електроенергії для випадку, коли межа балансової належності знаходиться на стороні вищої напруги силових трансформаторів, а розрахункові прилади обліку встановлені на стороні низької напруги. Знайшов подальший розвиток метод розрахунку сталого режиму роботи конденсаторних установок при наявності джерел вищих гармонік.

Розроблені критерії оптимізації перетікань реактивної потужності для різних джерел реактивної потужності та їх комбінацій. Визначені засоби та заходи, що унеможливають виникнення резонансних явищ в мережі під час пуску нелінійного навантаження, яке вмикається паралельно конденсаторній установці.

Ключові слова: системи електропостачання, якість електричної енергії, реактивна потужність, вищі гармоніки, конденсаторні установки.

Бедерак Я.С. Оптимизация перетоков реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий с учетом качества электроэнергии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2017.

В диссертационной работе разработан метод расчета фактических значений перетоков реактивной мощности в системе электроснабжения промышленных предприятий путем применения информационной базы автоматизированных систем учета электроэнергии в условиях, когда граница балансовой принадлежности с энергоснабжающей организацией находится на стороне высшего напряжения силовых трансформаторов, а расчетные приборы учета установлены на стороне низшего напряжения.

Доказано, что реальные значения потерь энергии в силовых трансформаторах зависят от характера нагрузки. При наличии генерации реактивной электроэнергии действующие в настоящее время нормативные документы в Украине завышают значение потерь активной и реактивной электроэнергии в силовых трансформаторах, а при потреблении реактивной электроэнергии занижают их по сравнению с действительными значениями потерь.

Усовершенствован метод расчета установившегося режима работы конденсаторной установки при наличии в сети источника высших гармоник путем использования значения резонансной частоты и импедансно-частотной характеристики в параллельном контуре, содержащем ее и активно-индуктивную

загрузку, для предотвращения резонанса токов на нечетных высших гармониках, кратных 50 Гц.

Разработаны критерии оптимизации перетоков реактивной мощности для различных источников реактивной мощности и их комбинаций при наличии ограничений переменных целевой функции. Определены меры, исключающие возникновение резонансных явлений в параллельном контуре, в одной ветви которого присоединена емкостная нагрузка, а в другой - активно-индуктивная, при кратковременном режиме пуска нелинейной нагрузки.

Усовершенствована методика проведения статистического анализа данных активных и реактивных электрических нагрузок в части определения условий получения интервалов стационарности и организации работы анализа данных в режиме реального времени.

Повышена точность оперативного прогнозирования данных электропотребления при использовании методов экспоненциального сглаживания Брауна и Хольта. Предложен вариант проверки данных о нулевом электропотреблении в точках учета. Разработан способ определения выборки данных наименьшего объема, которая обеспечивает минимальную ошибку модели. Предложены комплекты равновесных критериев выбора оптимальной одно- и многофакторной математической модели, применяемой для восстановления или прогнозирования учетных данных, из множества математических моделей.

Ключевые слова: системы электроснабжения, качество электроэнергии, реактивная мощность, высшие гармоники, конденсаторные установки.

Bederak Ya.S. Optimization of reactive power flows in power supply systems of industrial enterprises taking into account the quality of electricity. – Manuscript.

The thesis is for obtaining scientific degree candidate of technical sciences in specialty 05.14.02 - Electrical power stations, networks and systems. National Technical University of Ukraine "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2017.

The method of calculating the actual values of reactive power flows in power systems of industrial enterprises with varied load was developed in the thesis. This was done by applying the database of automated accounting systems of electric power under conditions, when the balance limit is on the side of high voltage of power transformers and computational metering devices are installed on the side of low voltage. Criteria of reactive power flows optimization for each reactive power source and their combinations were developed.

The method of calculating the established operating mode of capacitor bank with the source of higher harmonics was improved by determination the resonant frequency and creation dependence of the impedance absolute value on the number of higher harmonics in the network in order to prevent resonance of currents at higher odd harmonics that are multiples of 50 Hz. The number of working asynchronous electric motors in the group of the same type in real time was determined. Tools and actions which exclude resonance emergence in the power supply system, with working capacitor banks during the startup regime of nonlinear load were developed.

Keywords: power supply systems, electric power quality, reactive power, high harmonic, capacitor banks.