

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2022р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Система автоматичного керування режимом
реактивної потужності в електричних мережах при
несиметрії напруги ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-21МЗ-1,4
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр ГАРМАШ
« ____ » _____ 2022 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____ 2022 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гармаша Олександра Валерійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Система автоматичного керування режимом

реактивної потужності в електричних мережах при несиметрії напруги

The system of automatic control of the reactive power mode in electrical networks
with voltage asymmetry

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2022 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
більш ефективне управління реактивною потужністю БК при
несиметричності режиму, що зменшить втрати активної енергії в
електромережах без порушення показників несиметричності та відхилення
напруги реалізацією створених матмоделей. Завдання роботи: 1. Аналіз
сучасних методів управління реактивною потужністю батарей
конденсаторів в мережах 0,4 кВ. 2. Вибір параметрів для оцінки негативної
дії батарей конденсаторів на параметри електричного режиму.
3. Створити матмоделі управління реактивною потужністю батарей
конденсаторів різних схемних виконань при несиметричності напруг та
методу визначення оптимального вектора управління. 4. Дослідити ефект
впровадження результатів досліджень в дійсних умовах на комп'ютерній
моделі.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Науково-дослідна частина роботи</i>	<i>к.т.н., проф. Плешков П.Г.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>4.10.22</i>	
<i>2</i>	<i>Аналіз питання компенсації реактивного навантаження</i>	<i>14.10.22</i>	
<i>3</i>	<i>Робота батареї конденсаторів у випадку несиметричної напруги мережі</i>	<i>21.10.22</i>	
<i>4</i>	<i>Математичне моделювання оптимального управління реактивним навантаженням за умов несиметричності</i>	<i>04.11.22</i>	
<i>5</i>	<i>Дослідження оптимального управління реактивним навантаженням на комп'ютерній моделі</i>	<i>18.11.22</i>	
<i>6</i>	<i>Висновки</i>	<i>22.11.22</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11.22</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Гармаш О.В. Система автоматичного керування режимом реактивної потужності в електричних мережах при несиметрії напруги.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2022р.

Метою роботи є більш ефективне управління реактивною потужністю батарей конденсаторів при несиметричності режиму, що зменшить втрати активної енергії в електромережах без порушення показників несиметричності та відхилення напруги реалізацією створених матмоделей.

У кваліфікаційній роботі виконано теоретичне узагальнення та нове рішення актуальної науково-практичної задачі оптимального управління реактивним навантаженням за допомогою БК в умовах несиметричності режиму, що дозволить зменшити втрати активної потужності в електричних мережах без погіршення показників якості електроенергії, що ними нормується несиметричність та відхилення напруги.

Розроблено матмоделі для відшукування оптимального вектора управління реактивною потужністю в умовах несиметричності напруг електромережі з урахуванням впливу батарей конденсаторів на параметри електричного режиму.

Втілення на практиці реалізованих наукових розробок дасть змогу знизити рівень втрат активної потужності, дотриматись вимоги з компенсації реактивної потужності без порушення положення з якістю електроенергії по несиметричності та відхиленню напруги.

Ключові слова: компенсація реактивного навантаження, батарея конденсаторів, несиметричність напруги, система автоматичного управління.

THE SUMMARY

Harmash O. The system of automatic control of the reactive power mode in electrical networks with voltage asymmetry.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2022

The purpose of the work is more effective management of the reactive power of capacitor batteries in case of asymmetry of the regime, which will reduce the loss of active energy in power networks without disturbing the indicators of asymmetry and voltage deviation by implementing the created mat models.

In the qualification work, a theoretical generalization and a new solution to the actual scientific and practical problem of optimal management of reactive load with the help of BC in conditions of asymmetry of the regime, which will allow to reduce losses of active power in electric networks without deterioration of power quality indicators, which are normalized by asymmetry and voltage deviation, have been performed.

Math models have been developed to find the optimal vector of reactive power control in the conditions of asymmetry of the power grid voltages, taking into account the influence of capacitor batteries on the parameters of the electrical regime.

Implementation of the implemented scientific developments in practice will make it possible to reduce the level of active power losses, to comply with the requirement for reactive power compensation without violating the situation with the quality of electricity due to asymmetry and voltage deviation.

Key words: reactive load compensation, capacitor bank, voltage asymmetry, automatic control system.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	11
1.1 Використання БК з метою компенсації РП	11
1.2 Робота БК за умов несиметричної напруги.....	16
1.3 Проблеми керування БК та їх втілення на практиці	20
1.4 Постановка задачі дослідження	26
1.5 Висновки за першим розділом	29
РОЗДІЛ 2 РОБОТА БАТАРЕЇ КОНДЕНСАТОРІВ У ВИПАДКУ НЕСИМЕТРИЧНОЇ НАПРУГИ МЕРЕЖІ	30
2.1 Упливи реактивної потужності БК режими споживання електричної енергії.....	31
2.1.1. Уплив на несиметричність напруг в мережі	32
2.1.2. Уплив БК на величину додаткових утрат активної потужності	38
2.1.3. Уплив БК на відхилення напруги та його специфіка	42
2.2 Уплив, що здійснюється БК на режим роботи асинхронного двигуна	45
2.3 Оцінки впливу БК на несиметричність напруг у точці підключення та його показники.....	52
2.4 Висновки за другим розділом	59

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ЗА УМОВ НЕСИМЕТРИЧНОСТІ	60
3.1 Постановка завдання оптимального управління реактивними навантаженнями та шляхи його рішення, реалізований в роботі.....	61
3.2 Технічні обмеження вироблення керуючих рішень та підґрунтя вибору критерію ефективності	64
3.3 Матмоделі з урахуванням несиметричності напруг при керуванні БК.....	69
3.4 Матмоделі з урахуванням рівня відхилень напруг за фазами при керуванні БК	70
3.5 Розробка алгоритму аналізу створених матмоделей	72
3.6 Матмодель, яка враховує несиметричність напруг при управлінні секціями БК, що перемикаються зі схеми трикутник в зірку	75
3.7 Матмодель симетрування напруг для БК із симетруючими секціями	79
3.8 Тестування методу обчислення з аналізом результатів.....	80
3.9 Висновки за третім розділом.....	86
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ НА КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ.....	87
4.1 Модель системи управління РП в електромережі.....	88
4.2 Оптимальне управління реактивним навантаженням	96
4.2.1. Технологія здійснення комп'ютерного моделювання	96
4.2.2. Оптимальне управління реактивним навантаженням БК з однаковими міжфазними ємкостями	98
4.3 Технічні заходи для ефективного оптимального	104
4.4 Висновки за четвертим розділом.....	108
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	109
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	111
ДОДАТКИ.....	117
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	118

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

БК – батарея статичних конденсаторів

ВН – висока напруга

КРН – компенсація реактивних навантажень

НН – низька напруга

ОН – однофазне навантаження

ПЯУ – показники якості управління

РП – реактивна потужність

СЕР – система електропостачання

СН – симетричне навантаження

СПР – система прийняття рішень

ТП – трансформаторна підстанція

ВСТУП

Актуальність теми. В електромережах спостерігається несиметричність напруг. Вона виникає при підключенні однофазних електроприймачів [7 – 11]. Іноді показники несиметричності напруг [12] приближаються або перебільшують нормально та гранично припустимі значення.

Застосування управляємих батарей статичних конденсаторів (БК) для управління реактивною потужністю є засобом високої ефективності, що дозволяє зменшити втрати активної потужності, зменшити оплату за спожиту електричну енергію та покращити її якість [1 – 6].

Відомі методи управління реактивною потужністю (РП) за рахунок БК реалізуються так, щоб забезпечити поменше втрат активної енергії в електромережі або потрібні величини напруги. При цьому беруться до уваги технічні обмеження: на рівень живлячої напруги, динамічна стійкість вузлів навантаження, дійсна величина напруг у вузлі підключення БК.

Управління величиною потужності БК без урахування несиметричності напруг у точці їх підключення, може спричинити порушення вимоги ГОСТ 13109-97 за показниками якості електроенергії.

Тому актуальною задачею, рішення якої дозволить підвищити ефективність роботи БК, є удосконалювання методів управління реактивним навантаженням та створення матмоделей для сучасних систем прийняття управляючого рішення, які забезпечують процес управління із врахуванням несиметричності напруг на БУ. Це дасть можливість уникнути недопустимі впливи на показники якості.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є більш ефективне управління реактивною потужністю БК при несиметричності режиму, що зменшить втрати активної енергії в електромережах без порушення показників несиметричності та відхилення напруги реалізацією створених матмоделей.

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

- аналіз сучасних методів управління РП БК в мережах 0,4 кВ;
- вибір параметрів для оцінки негативної дії БК на параметри електричного режиму;
- створити матмоделі управління РП БК різних схемних виконань при несиметричності напруг та методу визначення оптимального вектора управління;
- дослідити ефект впровадження результатів досліджень в дійсних умовах на комп'ютерній моделі.

Об'єкт дослідження – процес управління реактивною потужністю управляємими батареями статичних конденсаторів.

Предмет дослідження – матмоделі управління реактивною потужністю за допомогою батарей статичних конденсаторів в електромережах.

Методи дослідження. В дослідженнях були використані метод симетричних складових, метод динамічного програмування, метод комп'ютерного моделювання, методи математичної статистики.

Наукова цінність кваліфікаційної роботи полягає в подальшому розвитку теорії та систем управління реактивною потужністю при несиметричності шляхом управляємих БК без порушення показників якості електроенергії.

Практична цінність кваліфікаційної роботи полягає у зменшенні втрат активної енергії в електромережах при одночасному забезпеченні стану якості електроенергії.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг роботи складає 121 сторінки. Основна частина викладена на 102 сторінках друкованого тексту, містить 32 рисунків та 16 таблиць. Список використаних джерел містить 45 джерел та викладений на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

З метою більш ефективного транспортування та розподілу електроенергії в електричних мережах необхідно виконувати керування реактивною потужністю в режимі онлайн [1, 2]. В якості технічного засобу для такого керування широко застосовуються БК. Останні здійснюють дискретні (по величині та часу) керуючі впливи на режимні параметри в електричній мережі.

Був виконаний аналіз наукових робіт, його результати наведені в даному розділі. Аналіз спрямований на встановлення можливостей підвищення ефективності транспортування електроенергії за рахунок покращення методів управління реактивними навантаженнями та створення для цього необхідного математичного апарату.

1.1 Використання БК з метою компенсації РП

Електричні установки що містять обмотки (електричні двигуни, трансформатори), окрім активної потужності споживають і реактивну. Під час транспортування реактивних навантажень в мережах організацій з енергопостачання відбуваються втрати активної потужності. Компенсація цих втрат відбувається за рахунок споживача електроенергії. [1 – 6].

Споживання РП інколи може перевищувати можливість її виробництва генераторами на електростанціях, внаслідок того, що більшість споживачів у промисловості потребляють також і реактивну потужність. Співвідношення між активною та реактивною потужностями, як відомо, зручно виражати за допомогою коефіцієнта потужності – $\cos\varphi$. Причому більшому реактивному

навантаженню відповідає менший $\cos\varphi$. Можна виділити дві групи заходів спрямованих на підвищення $\cos\varphi$ в електроустановках:

- для яких не потрібно встановлювати КП;
- для яких потрібно встановлювати КП.

Компенсація реактивного навантаження (КРН) є важливим фактором комплексу заходів з регулювання режимів споживання електричної енергії та обмеження максимальних значень навантаження на підприємствах.

КРН у споживачів дає такі переваги [1 – 6]:

- зменшити оплату за спожиту електроенергію;
- зменшити величину струму в елементах мережі, і тим самим зменшити перетин провідників;
- зменшити величину повної потужності, що дозволяє використовувати меншу кількість трансформаторів і меншої потужності;
- зменшити втрати активної електроенергії, що дозволяє в загальному знизити номінальну потужність генераторів на електростанціях;
- підвищити рівень показників якості електричної енергії за рахунок зменшення рівня відхилень напруги від рівня номінального.

КРН реалізується за допомогою компенсуючих пристроїв: синхронні двигуни, конденсаторні батареї, фільтро-компенсуючі установки, симетрувально-компенсуючі установки, статичні компенсатори (конденсатори або реактори що керуються тиристорами). При цьому КЗ розміщуються у вузлах електромережі споживача [1 – 6, 15 – 18].

Найважливішим показником ефективності компенсуючих засобів з точки зору економіки є питомі витрати активної потужності на отримання одиниці реактивної. Адже генерація РП при одночасно великих втратах активної є недоцільною.

БК мають ряд переваг порівняно з іншими КЗ [1, 16]:

- низькі питомі витрати активної потужності 5 Вт на 1 квар;

- відсутні рухомі частини;
- простий монтаж та обслуговування;
- відносно малі капіталовкладення;
- широкий номенклатурний ряд номінальної потужності;
- виключений шум під час роботи;
- низькі експлуатаційні витрати.

Сучасні БК бувають трифазні та однофазні. На них передбачують розрядні опори та пристрій захисту від перенапруг. Це забезпечує їх високу надійність. Потужність БК складає від 2,5 квар (для 0,4 кВ) та від 25 квар (для 6,3 кВ). Сучасні матеріали дозволяють зменшити габаритні розміри. Робоча температура складає від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ у варіанті для внутрішньої та зовнішньої установки (IP 42).

Основним недоліком БК є залежність потужності генерації БК від величини напруги і частоти; низька механічна міцність під час аварійних режимів, вимогливість до синусоїдальності форми кривої напруги живлення.

Величини потужності БК повинна забезпечувати реактивне навантаження виробництва, корпусу, підприємства. Одночасно необхідно уникнути генерації РП в розподільчу мережу енергосистеми [19, 20]. Перекомпенсація спричинює лише втрати активної потужності. Таке явище характерне під час мінімальних навантажень (нічний період доби, неробочі дні). Це спричинює необхідність використання потужності підключеної БК в залежності від графіка споживання реактивного навантаження підприємства.

Генерація БК реактивної електроенергії можливо реалізувати дискретно шляхом поділу БК на секції. Чим більше число таких секцій, тим якісніше можна реалізувати керування.

Секції в автоматичному режимі вимикаються та вмикаються залежно від величини напруги, часу доби тощо.

В результаті вибору типу, номінальної потужності, місця підключення і алгоритму управління БК має забезпечувати максимальний ефект. При цьому необхідно враховувати наступне [19, 20]:

- максимальна економічна ефективність буде досягнуто при встановленні БК безпосередньо поблизу приймачів електричної енергії;
- БК можна підключати до одиничних споживачів з великим коефіцієнтом використання;
- найбільша ефективність для потужних споживачів досягається при індивідуальній компенсації (необхідно передбачити відключення БК при відключенні споживача).

Економічно доцільним варіантом КРН є той, для якого будуть мінімальні приведені річні затрати. Останні складаються із затрат на БК і затрат, які спричинені процесом виробництва та розподілу РП [19, 20]. Керовані змінні функції витрат обмежуються по технічним показникам:

- 1) умова балансу РП в мережі:

$$Q_{\text{сум}} - Q_{\text{н.сум}} - \Delta Q_{\text{сум}} + Q_{\text{el}} = 0,$$

де $Q_{\text{сум}}$ – сумарна реактивна потужність БК;

$Q_{\text{н.сум}}$ – сумарне реактивне навантаження;

$\Delta Q_{\text{сум}}$ – втрати РП;

Q_{el} – реактивна потужність що надходить від електричної мережі;

- 2) умова технічної можливості заданого режиму роботи БК:

$$Q_{\text{min}} \leq Q \leq Q_{\text{max}},$$

Q_{min} , Q_{max} – відповідно мінімальна і максимальна величина РП генерації або споживання;

3) умова по напрузі на затискачах електроприймачів:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max},$$

$U_{\min}$, $U_{\max}$ – мінімально та максимально допустиме відхилення напруги.

Виділяють наступні способи КРН [15, 16].

1. При Індивідуальній КРН БК підключають безпосередньо біля приймачів електроенергії, рис. 1.1 а. Вимикач приймача одночасно виконує функцію вимикача БК. Використовується для компенсації одиничної потужності понад 20 кВт, що підключена протягом тривалого часу постійно (як правило двигуни). Недолік способу є те, що він вимагає істотних капіталовкладень.

Разом з тим індивідуальна компенсація є найпростішим технічним рішенням. БК обирається за номінальною потужністю і $\cos \phi$ споживача. Реактивне навантаження споживача компенсується постійно протягом всього часу роботи, $\cos \phi$ достатньо високий. Перевагою способу є низький рівень експлуатаційних затрати.

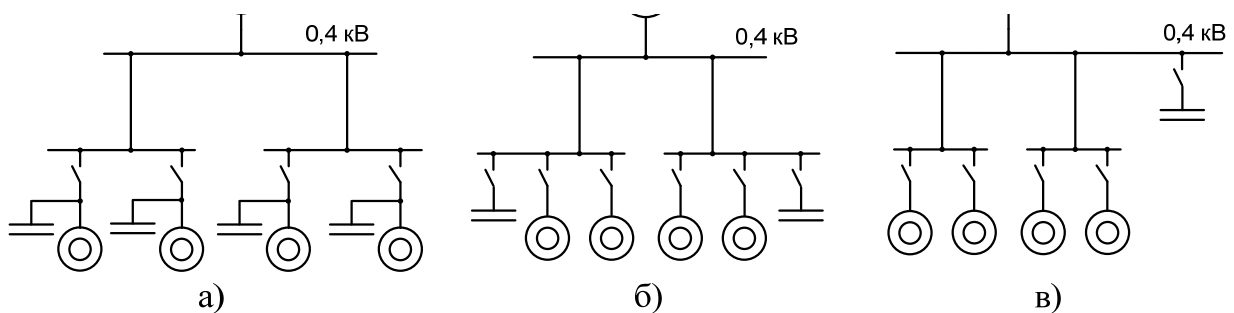


Рис. 1.1. Схема підключення БК при таких способах КРН:

а) індивідуальна; б) групова; в) загальна

Спосіб індивідуальної КРН є особливо ефективним, коли більшість РП споживається малою кількістю приймачів тривалий час.

2. У випадку групового способу КРН декілька активно-індуктивних навантажень підключаються до одного пристрою розподілу електроенергії із спільною БК, рис. 1.1 б. Зростання коефіцієнта одночасності включення навантаження дозволяє зменшити потужність і підвищує робочу ефективність БК. До недоліків способу слід віднести окрему комутацію БК і завантаження розподільчих мереж підприємства реактивною потужністю.

3. При загальній компенсації рис. 1.1 в. одна БК встановлена на підстанції або на центральному розподільному пристрої. Загальна КРН потребує менших затрат, але не дозволяє розвантажити цехову кабельну електромережу і кабелі індивідуальних електроприймачів від РП.

Характер зміни навантаження протягом дня є основним визначником при виборі схеми КРН. Часто не все устаткування одночасно увімкнене або активно працює. Багато верстатів працюють лише кілька годин на день. Тому спосіб індивідуальної компенсації виходить занадто вартісним технічним рішенням, якщо кількість устаткування і відтак число встановлених БК велике. Переважна кількість БК матиме низький коефіцієнт використання.

Загальна компенсація доцільна у разі зміни навантаження протягом дня. Тоді споживання реактивної енергії на протязі дня теж змінюється, і стає доцільним застосування автоматично керованих БК.

Проведені дослідження охоплюють випадки групової та загальної КРН.

1.2 Робота БК за умов несиметричної напруги

Використання пристроїв БК спричинює наступні ефекти.

1. Зниження втрат активної електроенергії [17 – 19], які відбуваються в елементах системи електропостачання (СЕП) у випадку завантаження їх реактивною енергією.

2. Підвищення напруги при роботі БК. Цей ефект можна використати для регулювання рівня напруги [3, 17, 20, 21 – 23], якщо потрібно забезпечити величину напруги на затискачах електроприймачів.

Керовані БК найпростіші і найефективніші засоби регулювання напруги на місцевому рівні [19]. Однак при ступінчастій зміні потужності БК в СЕП може виникнути резонанс струмів на частоті однієї із гармонійних складових джерела живлення.

3. Уменшення розмаху коливання напруги шляхом зниження розмаху коливання споживання РП реалізується використанням швидкодіючих БК. Ефективність такого способу знаходиться в залежності від швидкодії БК. Тобто як швидко можна відслідкувати зміну величини навантаження і відповідно підлаштувати зміну потужності БК. Особливо ефективними для компенсації коливань напруги є БК, що увімкнені в коло поздовжньо [18].

4. Зниження рівня несиметричності напруг [18, 23, 24], що викликана наявністю несиметричних електроприймачів. Реалізується використанням спеціальних пристроїв симетрування, спроектованих на базі БК.

5. Зменшення величини вищих гармонічних складових реалізується шляхом застосування фільтрів вищих гармонік. Вони включають послідовно з'єднаний реактор і БК. Номінальні параметри реактора і БК розраховують так, щоб їх сумарний опір на частоті певної гармоніки дорівнював нулю. В ідеалі на кожну гармоніку потрібен окремий фільтр.

Вказані ефекти застосування БК можна використовувати за певних умов їх роботи (відхилення та несиметричність напруг). Особливо, якщо вказані параметри сягають граничних значень, зокрема, визначених ГОСТ 13109-97. Параметри БК при цьому змінюються і їх вплив на електричні мережі буде відрізнятися від того, яким був би за умови симетричної, синусоїдальної напруги номінального рівня.

Вплив умов роботи БК на їх параметри було описано в джерелах [8, 13]. Основні результати, що отримані для БК призначених для КРН описано нижче.

1. Втрати активної потужності – ΔP_2 в пристроях БК викликані несиметричним режимом:

$$\Delta P_2 = Q_H \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot k_{2U}^2,$$

$\operatorname{tg} \delta$ – коефіцієнт діелектричних втрат на частоті першої гармоніки;

k_{2U} – коефіцієнт несиметричності напруг за зворотною послідовністю.

Дані розрахунків [21] свідчать, що ΔP_2 в БК малі і при $k_{2U} = 10\%$ менші 0,01% від величини загальних втрат.

2. До БК окремих фаз при $k_{2U} \neq 0$ прикладені різні фазні напруги. Це може спричинити їх перевантаження або недовантаження. Потужність БК визначається [13]:

$$Q = Q_H \cdot \left(\frac{U_1}{U_H} \right)^2 (1 + k_{2U}^2),$$

де U_1 – величина напруги прямої послідовності;

U_H – значення номінальної напруги БК.

3. Додатковий нагрів ізоляції БК в тих фазах, до яких прикладена підвищена напруга, можна знайти з виразу [13]:

$$\Delta \tau_\Phi = \tau_H \left[k_{2U}^2 + 2k_{2U} \cos f(\psi_2) \right],$$

де τ_H – нагрівання ізоляції БК за умов симетричної номінальної напруги;

ψ_2 – кут між відповідними лінійними напругами прямої та зворотної послідовностей;

$f(\psi_2)$ – функція залежності від.

4. Підвищена напруга на БК спричинює посилення іонізаційних процесів в ізоляції. Даний факт негативно позначається на строку служби ізоляції. Зменшення терміну служби ізоляції БК описується залежністю [13]:

$$\Delta t_U = \frac{2[k_{2U}^2 + 2k_{2U} \cos f(\psi_2)]}{1 + \frac{\pi}{2} k_{п.і.}},$$

$k_{п.і.} = 0,15 - 0,2$ – відношення номінальної напруги БК і напруги початку іонізації.

При $k_{2U} = 2\%$ скорочення роботи ізоляції БК становить 20 – 25%.

Конденсатори, на затискачі яких подані різні міжфазні напруги, створюють різні добавки напруги по фазах і несиметричність напруг росте.

В [4] відмічено, що включення БК у випадку несиметричності напруг спричинює зростання напруги зворотної послідовності. Вирішувати дану задачу можливо за два кроки. Спочатку вирішується задача компенсації РП, ігноруючи несиметричність напруг. Потім у вузлах, яких несиметричність перевищує допустиме значення підбирається схема КП несиметричного виконання. Величина потужності береться та, що визначена на першому кроці розрахунку. Так досягається одночасно зменшення несиметричності напруг.

В [9] виконано аналіз умов компенсації РП симетричних навантажень, але за умов часткового симетрування. Показано, що під'єднання КП змінює величину та характер опору мережі. КРН з допомогою симетричних БК стає причиною росту несиметричності напруг, так як змінюється опір зворотної

послідовності мережі. Результируючий опір зворотної послідовності зростає, і відповідно напруга зворотної послідовності тяж).

Стверджується, що КРН в мережах де є несиметричне навантаження слід виконувати за рахунок несиметрично ввімкнених БК, або двоелементних споживачів.

1.3 Проблеми керування БК та їх втілення на практиці

Окремим науковим завданням, якою буде визначається ступінь ефективності КРН, є створення технічних пристроїв та математичного забезпечення систем управління.

Керування генерацією реактивної потужності реалізується за рахунок зміни величини потужності БК [3]. При цьому враховується особливості їх конструктивного виконання та з урахуванням всіх пов'язаних впливаючих факторів. Станом на сьогодні є значна кількість засобів керування БК в автоматичному режимі. Відмінність їх між собою полягає у принципах, параметрах і моделях управління. Необхідність її використання виникає у разі:

- запобігання недостатньої та надлишкової компенсації у вузлах, що мають нерівномірний графік електронавантажень та спричиненим цим втратам;
- виконання споживачами електроенергії вимог, що висуває оператор енергосистеми і які стосуються споживання РП і енергії з її мереж по різних зонах доби;
- утримання величини відхилень напруги в межах, які допускають діючі стандарти;
- максимізації зниження втрат активної електроенергії в час провалу та зниження електроспоживання за рахунок досягнення нульових (або близьких до них) значень перетоків.

Недоліками, згаданих в [3] установок і систем, є:

- неможливість дотриматися вимог енергосистем щодо узгодження перетоків РП на межі розподілу балансової належності мереж енергосистем та споживачів;
- не передбачено мінімізації втрат активної потужності в електромережах внаслідок перетоків РП, яка не була скомпенсована;
- не здійснюється контроль РП у вузлах і на вводах підприємства;
- ігнорується наявності трансформаторів з пристроєм РПН;
- не враховані порушення умови, за якої досягається оптимальність керування у випадку зміни числа включених в роботу БК.

В [16] запропонована система (складається з двох рівнів) управління графіком реактивного навантаження встановленою потужністю БК мінімальної величини. Система дозволяє забезпечити доведений енергопостачальною організацією графік споживання, допустимі величини напруг у певних вузлах електричної мережі, мінімальні значення втрат активної потужності в мережах споживача. Участь у керуванні можуть брати як БК з рівними міжфазними ємностями так і БК, що включені до складу симетруючих пристроїв. Дослідження виконані в припущенні, що напруга у вузлах підключення БК симетрична і рівна номінальній за значенням.

У роботі [17] оглядається питання підвищення показників якості електричної енергії як загальносистемне. Воно включає в себе і питання КРН, яка представляється у виді рішення окремих задач, а саме: підтримання балансу РП в енергетичній системі та допустимих величин напруги на клеммах генераторів електростанцій та споживачів, досягнення мінімального значення приведених затрат на КП. Вирішування кожної із них необхідна, але не достатня умова праці електричної мережі в оптимальному режимі. Показано, що застосування БК є найбільш ефективним засобом для КРН в цілому, так і при розв'язанні кожного завдання окремо.

В [5] описано ряд можливостей автоматичного управління потужністю БК: у функції часу доби, в залежності від величини напруги, залежно від струму навантаження, з урахуванням величини та напрямку РП, за величиною $\cos \varphi$ і комбіноване управління. Залежно від конкретних умов чиниться вибір способу управління. По перше, враховується аналіз добових графіків навантаження підприємства, а також техніко-економічні показники.

В [25, 26] оглядається автоматичний регулятор РП БК. В якості параметра керування обрана реактивна складова комплексного струму навантаження. До входу вимірювальної схеми параметрів регулятора через трансформатор струму надходить сигнал, що залежить від повного струму однієї з фаз та сигнал про значення лінійної напруги двох других фаз мережі. Залежно від величини і знаку реактивної складової повного струму видається сигнал, що відповідає поточній величині напруги і пропорційний значенню РП мережі, та заданому рівню компенсації. У разі перевищення останнього автоматично відбувається включення секції БК. Описана схема вимірювання входних параметрів управління застосовна лише при симетричному режимі роботи електромережі. В разі несиметричності напруг регулятор РП [25, 26] змушений містити по два парних канали вимірювання струму і напруги.

За рахунок БК, що вже експлуатуються, можна одночасно виконувати КРН і симетрувати активно-індуктивні навантаження [24]. Реалізується це шляхом комбінування підключення секцій БК на різні міжфазні напруги трифазної мережі так, щоб знизити величину несиметричності напруг до значень, що допустимі. Необхідно брати до уваги порушення симетрії напруг трифазної системи, що викличе відповідну зміну потужності секцій БК. В симетрування напруг за допомогою БК реалізується в умовах післядії: ввімкнення секції БК міняє напругу у точці підключення БК. Це призводить до зміни потужності раніше ввімкнених секцій, що викликає зміну генерованих

ними добавок напруги прямої / зворотної послідовності, що знову ж таки спричиняють зміну прикладеної напруги і т.д.

В роботах [3] робиться огляд способів оптимального управління БК і пристрої, що забезпечують дотримання вимог енергосистеми стосовно споживання РП з її мережі: мінімальні втрати в мережах системи у всіх режимах роботи, максимальне застосування БК для зниження втрат електроенергії, врахування особливостей реальної СЕП. Один зі способів заснований на визначенні оптимальних (по умові мінімуму втрат активної потужності під час передачі реактивної енергії) величин вхідної РП на затискачах окремих вузлів і реалізації контролю реальних значень вхідної РП на входах окремих вузлів, порівнюючи їх з уставками. При цьому нехтується фактичний рівень несиметричності напруг та величина напруги у фазах.

В [27] розглянуто модернізацію регулятора АРКОН. Введенням дешифратора можливо змінювати число регульованих секцій БК. Це дозволяє виконувати регулювання РП більш плавно. Також наведена залежність відносних значень сумарної потужності БК від величини фазної напруги при з'єднанні БК трикутником та зіркою з нулем.

В [28 – 30] виконано аналіз впливу ступеня КРН і рівня напруги на величину споживаної від джерела живлення активної потужності, враховуючи статичні характеристики навантаження. Джерелом РП виступає БК. Їх потужність змінюється залежно від квадрату напруги. В [28 – 30] приводяться залежності від ступеня КРН втрат активної потужності, що витрачаються на її передачу, зміни споживання потужності приймачів, втрат та відхилення напруги. З цих залежностей зрозуміло, що при зростанні рівня КРН підвищується величина напруги на затискачах споживачів. При стабільній напрузі джерела живлення втрати напруги в мережі падають. Внаслідок зростання відхилення напруги підвищується споживання активної потужності

відповідно статичних характеристик навантаження. В результаті сумарне споживання активної потужності від мережі живлення стає більшим.

В [31] виконано дослідження КРН за рахунок БК з використанням секцій дискретного керування. Наведені розрахункові формули, що дозволяють по відомим величинами графіка реактивного навантаження і характеристиками БК знайти математичне очікування, закон розподілу густини ймовірності, середньоквадратичне відхилення для величини некомпенсованої РП.

В показано, що установка БК в ряді випадків спричинює недоцільні грошові затрати і інших погані наслідки. Вони пов'язані із ростом споживання електроенергії зниженням її якості. Генерація РП БК призводить до росту напруги на клеммах електроприймачів, росту потужності, яка споживається, значення якої визначається статичними характеристиками навантаження. Негативним є зростання активної потужності виробленої електростанціями. Також потрібно підвищувати коефіцієнт трансформації трансформаторів 10/0,4 кВ або 6/0,4 кВ у порівнянні з оптимальним до установки БК, періодично здійснювати контрольні заходи та аналіз режимів напруги [32].

Необхідно також врахувати, що швидкість росту споживання активної потужності при зростанні потужності БК майже пропорційна їй та не залежить від величини компенсації. Швидкість же зниження втрат в мережі із ростом величини компенсації падає.

Автоматичний регулятор потужності БК враховує реактивне споживання однієї із фаз та зважаючи на неоднаковість розподілу РП по фазах, у несиметричних режимах роботи мережі спостерігається недостатня компенсація і/або надлишкова компенсація в інших фазах. Показники ж надійності роботи БК, що включають велику кількість секцій малої потужності внаслідок значного числа комутацій зменшується.

Також можливе значне зниження якості напруги внаслідок наявності вищих гармонік у випадку виникнення резонансу струмів чи близького режиму

при підключенні БК до шин НН трансформатора та наявності нелінійних навантажень.

Отже, перед встановленням БК потрібно виконати ретельний техніко-економічний аналіз на предмет доцільності КП та намітити заходи, що упередять або дозволять мінімізувати шкідливі наслідки викликані роботою БК.

За останні десять років споживання електроенергії на одиницю площі у побутовому секторі зросла втричі, то загострюється питання компенсації РП для комунально-побутових споживачів, зокрема в сільській місцевості.

Неоднакове по фазам завантаження реактивною потужністю утруднює застосування трифазних БК із однофазним регулятором. Внаслідок нерівномірного розподілу РП за фазами, в окремих фазах напрямок протікання струму при компенсації може бути протилежний необхідному. Це призведе до зниження загальної пропускної здатності лінії та зростання наявної несиметричності напруг [31]. З метою подолання цієї проблеми виробляють серії КУ у однофазному виконанні. Управління ними може бути реалізоване трьохканальними мікроконтролерами.

В джерелі [32] оцінено можливість індивідуальної компенсації РП на затискачах асинхронного двигуна (АД) з допомогою секцій БК. Прийнято, що втрати активної потужності в БК нульові, а перемикачі, що здійснюють комутацію – ідеальні. Встановлено, що при певних значеннях потужностей секцій БК максимальні значення коливань електромагнітного моменту, напруги і струму можуть значно бути завищеними.

Головним призначенням рішення задачі КРН є вибір номінальної потужності БК, місця і способу їх підключення в мережі. В роботі [33] пропонується алгоритм, що дає можливість аналізу змін ТЕП мережі залежно від рішення задачі КРН. Розглянуто такі способи компенсації: на стороні ВН з використанням високовольтних ККУ; на стороні НН з використанням низьковольтних ККУ; використання в якості КП синхронних двигунів в режимі

перезбудження. Аналіз [33] дозволяє обрати спосіб КРН, враховуючи пріоритетності критеріїв ефективності. Для прикладу: істотне зниження втрат активної потужності (понад 30%) по мережі (фактор енергозбереження) вимагає установки низьковольтних БК, проте варто також не забувати про значні капіталовкладення на їх монтаж. Варіант при одночасній установці високовольтних і низьковольтних БК може бути менш затратний. При цьому поліпшається економічність мережі шляхом зменшення номінальних потужностей ТП, річні приведені затрати можна знизити до 16% .

На підприємстві БК можуть встановлюватися на стороні ВН або/і НН. Це обумовлюється або вимогами техпроцесу або результатами економічних розрахунків. В [34] пропонується застосовувати одну БК на двох напругах 110 кВ або 10 кВ дивлячись на якій стороні напруги споживається більша реактивна потужність.

1.4 Постановка задачі дослідження

Аналіз літературних джерел показав, що дослідженням питання компенсації реактивних навантажень взагалі та управлінням величиною реактивної потужності зокрема приділялася значна увага багатьох вчених, авторських колективів, наукових установ як в Україні та за кордоном.

Більшість останніх наукових робіт присвячених питанням управління реактивною потужністю ставить за мету розробку нових технічних засобів КРН з можливістю керування, або ж покращення показників використання відомих зразків. Приведені результати в деяких випадках дозволяють повністю розв'язати завдання КРН. Однак варто відмітити наступні недоліки відомих способів управління, які іноді не дають можливості реалізувати ефективне управління реактивною потужністю, та зазначаються у результатах наукових досліджень.

1. В основі розробки способів управління реактивною потужністю лежить припущення про симетричну напругу джерела живлення. Проте, в сучасних мережах компаній з енергопостачання та іноді в мережах споживачів експериментально [7 – 11] виявлена несиметричність напруг. Вплив БК, які підключені на несиметричну напругу, на режимні електричні параметри досліджені на недостатньому рівні. Можна зробити припущення, що можливі рішення з керування, втілення яких буде не задовольняти вимоги ГОСТ 13109-97 або вимоги технологічного процесу. Такі рішення вважають технічно недопустимими.

2. Завдання підтримання відхилень напруги в допустимих межах у вказаному випадку трактується інакше. Потрібно провести дослідження, які нададуть можливість приймати керуючі рішення, які дозволять утримати відхилення напруги для три- та однофазних електроприймачів у допустимих межах.

3. Показники якості електричної енергії включно з параметрами несиметричності для величини напруги нормується в точці підключення споживача до розподільних мереж енергопостачальної організації. КРН може здійснюватися у віддалених вузлах. При цьому в точці підключення відповідний параметр за умови дотримання вимог ГОСТ 13109-97 може бути незадовільним і набувати понаднормових значень, у випадку коли несиметричність спричинюється однофазними електроприймачами підключених до мереж споживача, або менша значень, коли несиметричність спричинена електроприймачами зі сторони енергосистеми. Тому потрібно проводити обґрунтування допустимих значень показників несиметричності напруг у вузлі підключення БК.

4. Завдання управління реактивною потужністю за своєю суттю є оптимізаційною. Для її коректної постановки необхідно провести дослідження, що дають можливість обґрунтувати критерій оптимальності. Адже критерії

ефективності, які зазвичай прийнято використовувати для оцінки впливу на несиметричність напруг, можуть давати спотворені результати.

5. Забезпечити досягнення максимального значення критерію ефективності і разом з тим виконати ряд технічних вимог можливо за рахунок аналізу оптимізаційної математичної моделі. Потрібні аналітичні співвідношення, які зв'язують критерій ефективності та керовані параметри режиму із керованими змінними, можна встановити провівши відповідні дослідження.

6. Методів вирішення оптимізаційних задач досить багато. Для конкретних задач вони володіють певною трудомісткістю. Це виражається в тому що для вирішення задачі потрібно виконати певну кількість ітерацій, загальний обсяг розрахунків, який можна оцінити як кількість елементарних арифметичних операцій, потрібний об'єм пам'яті рахункового пристрою).

Враховуючи мікропроцесорне втілення зроблених досліджень необхідно провести дослідження що до вибору або розробки для завдання КРН методу аналізу мат моделі керування, який би працював для умов несиметричності напруги.

На підставі викладеного аналізу означимо наукові задачі, розв'язання яких дасть можливість збільшити ефективність управління реактивним навантаженням за допомогою БК:

- показати, що за деяких обставин потрібно враховувати несиметричність напруг у вузлі підключення БК;

- провести обґрунтування параметрів для можливості оцінки негативного впливу БК в зазначених умовах на параметри електричного режиму;

- математичні моделі управління величиною реактивної потужності за допомогою БК при застосуванні різних схемних рішень в умов наявності несиметричності напруг а також метод для можливості їх числового аналізу;

– перевірити рівень ефективності застосування отриманих результатів в умовах реального використання в електричних мережах.

1.5 Висновки за першим розділом

1. Одним із ефективних способів зменшення втрат активної потужності в електричних мережах виступає компенсація реактивних навантажень за допомогою застосування БК.

2. БК мають ряд переваг, якщо порівнювати їх з іншими КП. Їх можна використовувати для зменшення розмаху коливання напруги, зниження втрат активної потужності, регулювання величини напруги, покращення показників несиметричності напруг та вищих гармонік.

3. Методи та способи управління генерацією реактивної потужності за допомогою БК, які існують на даний момент, реалізують таке керування, щоб забезпечити мінімальний рівень активних втрат в електричній мережі або потрібні рівні напруги.

4. Існуючі на даний момент часу установки і прилади реалізують керування генерацією реактивної потужності не беруть до уваги величину несиметричності напруг у вузлі електричної мережі. Однак фактор несиметричності необхідно враховувати при реалізації процесу управління реактивним навантаженням за допомогою БК, що викликає потребу в проведенні додаткових досліджень.

РОЗДІЛ 2

РОБОТА БАТАРЕЇ КОНДЕНСАТОРІВ У ВИПАДКУ НЕСИМЕТРИЧНОЇ НАПРУГИ МЕРЕЖІ

Режими несиметричні за напругою чинять негативний вплив на БК, що було досліджено науковцями у [8, 9, 11, 13, 22]. Разом з тим БК, підключені до несиметричної напруги, чинять вплив на режими роботи електричної мережі. Проте рівень дослідження цього питання залишається низьким.

З метою ефективного управління БК у випадку несиметричності напруг необхідно дослідити наступні питання:

- яким чином впливає підключення БК на показники несиметричності та відхилення напруги;
- як несиметричність режиму впливає на добавочні утрати потужності;
- якими показниками оцінюють вплив БК на несиметричність режиму?
- коли потрібно врахувати вплив БК на несиметричність напруг а також над якими параметри при цьому слід здійснювати контроль;
- яким чином обґрунтовуються граничні значення параметрів несиметричності напруг при управлінні БК.

З метою дослідження поставлених питань:

- здійснено аналіз впливу БК на напруги оберненої /нульової послідовності; добавочні утрати активної потужності, спричинені несиметричністю режиму; на відхилення напруги;
- розглянуто вплив БК на режим праці АД, що є найвразливішим електроприймачем до несиметричності напруг, і получена можливість швидкого визначення граничних параметрів електричного режиму, з урахуванням умови припустимого його нагрівання;

- здійснено аналіз зміни показників для оцінки впливу БК на несиметричність напруг в розподільній електричній мережі.

2.1 Впливи реактивної потужності БК режими споживання електричної енергії

З метою компенсації РП та зменшення несиметричності напруг, які мають стійкий тренд до росту, примінюються управляємі БК. Окремі секції мають схему з'єднання трикутник, а їх між фазні ємності однакові. Для покращення кінцевого підсумку управління та збільшення ефективності примінення БК ватро передбачати таку принципову схему секцій, яка дозволяє включати їх як на лінійну (схем трикутник), так і на фазну (схема зірка з нульовим провідником) напругу [27]. Такі секції БК мають більше число комбінацій їх включення. Це надає можливість із дискретного ряду потужностей з більшою точністю підібрати необхідну її величину.

Для забезпечення потрібного ефекту із симетрування напруг в складі БК може бути передбачено одна або кілька секцій для симетрування за неповнофазною схемою. В загальному вплив такого пристрою на режим роботи можна розглядати суму накладання впливів трифазних секцій та впливу секцій симетрувальних. Вплив симетрувальних секцій на мережі при несиметричній напрузі розглядався в роботах [35]. Впливи трифазних секцій БК з рівними фазними або міжфазними ємностями на мережу при підключенні до несиметричної напруги досліджені на недостатньому рівні. Тому були виконані дослідження що стосуються впливу на електричні мережі саме таких секцій.

Виконані пошуки не охоплюють всі можливі випадки. Получені результати розповсюджуються лише на мережі номінальною напругою 0,4 кВ енергокомапній та електроспоживачів, для яких справедливі припущення:

1. навантаження являють собою сталі опори, що відповідає статичним характеристикам для навантаження у вигляді квадратичних залежностей.

2. режими генерування РП від БК в мережі електроживлення не передбачений.

2.1.1 Уплив на несиметричність напруг в мережі. Як показують експерименти Несиметричність напруг електричних мережах енергокомпаній може сягати суттєвих значень, в тому числі і наближатися до меж нормованих значень. Здійснимо кількісну оцінку того яким чином управління РП за допомогою БК за таких умов скажеться на параметрах стану системи та на роботі самих БК.

Щоб даним дослідженням захватити всі можливі випадки, розглянемо варіанти комутування секцій БК в трикутник та зірку з нульовим проводом.

Включення БК з однаковими фазними або міжфазними ємностями, в мережах із несиметричністю напруг стає причиною того, що відповідні потужності мають різну величину. Додатки напруги, які виникають в результаті включення, будуть неоднакові як по фазних, так і по лінійних напругах. Вони можуть бути охарактеризовані як несиметричні. Тоді можна зробити аналіз застосувавши метод симетричних складових. Імовірні впливи на несиметричність режиму будуть охоплені розглядом додатків напруг прямої / оберненої / нульової послідовностей.

Додатки напруги прямої – $\Delta \dot{U}_1$, оберненої – $\Delta \dot{U}_2$, нульової послідовностей – $\Delta \dot{U}_0$ розраховуються [14]:

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{1 \text{ після}} - \dot{U}_{1 \text{ до}} \quad (2.1)$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{2 \text{ після}} - \dot{U}_{2 \text{ до}} \quad (2.2)$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{U}_{0 \text{ після}} - \dot{U}_{0 \text{ до}} \quad (2.3)$$

$\dot{U}_{1\text{після}}, \dot{U}_{2\text{після}}, \dot{U}_{0\text{після}}$ – напруги прямої / оберненої / нульової послідовності після включення БК у точці їх підключення до мережі;

$\dot{U}_{1\text{до}}, \dot{U}_{2\text{до}}, \dot{U}_{0\text{до}}$ – те саме, до включення.

Наведемо випадок, коли живлення споживача здійснюється від джерела симетричних напруг безкінечної потужності через лінію електропередачі з трансформатором. Несиметричність напруг обумовлена однофазним електронавантаженням (ОН) в схемі електропостачання споживача, яке отримує живлення від окремої лінії від ТП. Інші електроприймачі (які виконані симетричними) отримують живлення від цієї ж ТП, рис. 2.1, а. Несиметричність напруг обумовлена еквівалентними е.р.с. оберненої ($\dot{E}_2$) і нульової ($\dot{E}_0$) послідовностей електроприймачів однофазного виконання, що підключені до мереж споживача. Заступні схеми для струмів оберненої / нульової послідовностей для такого випадку приведені на рис. 2.1, б, в відповідно, де $\underline{z}_0^{(1)} = r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}$ – комплексний опір струмам оберненої / нульової послідовностей лінії, по якій живиться група ОН; $\underline{z}_2^{(2)} = r_2^{(2)} + j \cdot x_2^{(2)}$ та $\underline{z}_0^{(2)} = r_0^{(2)} + j \cdot x_0^{(2)}$ – результуючий опір мереж споживача що мають симетричні навантаження (СН) та елементів електромережі енергокомпанії. Вузол А – вузол підключення БК, що досліджується.

Додаток фазної напруги прямої послідовності можна визначити:

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\dot{U}_{1\text{до}}}{U_{\text{ном.ф}}^2} \cdot \frac{\underline{z}_1^{(1)} \cdot \underline{z}_1^{(2)}}{\underline{z}_1^{(1)} + \underline{z}_1^{(2)}} \cdot \Delta Q_{\text{ном}} \quad (2.4)$$

$\dot{U}_{1\text{до}}$ – вектор напруги прямої послідовності у точці А до включення БК;

$z_1^{(1)}$ – опір струмам прямої послідовності складових елементів електричної мережі енергокомпанії;

$z_1^{(2)}$ – опір струмам прямої послідовності лінії від якої отримують живлення група несиметричних електроприймачів та розподільних електромереж споживача;

$\Delta Q_{ном}$ – номінальна потужність БК, відповідає номінальній симетричній напрузі, виходячи з того що БК підключається на лінійну напругу (при схемі трикутника) або фазну напругу (при схемі зірка з нулем);

$U_{ном.ф}$ – номінальна фазна напруга електромережі, до якої підключається БК.

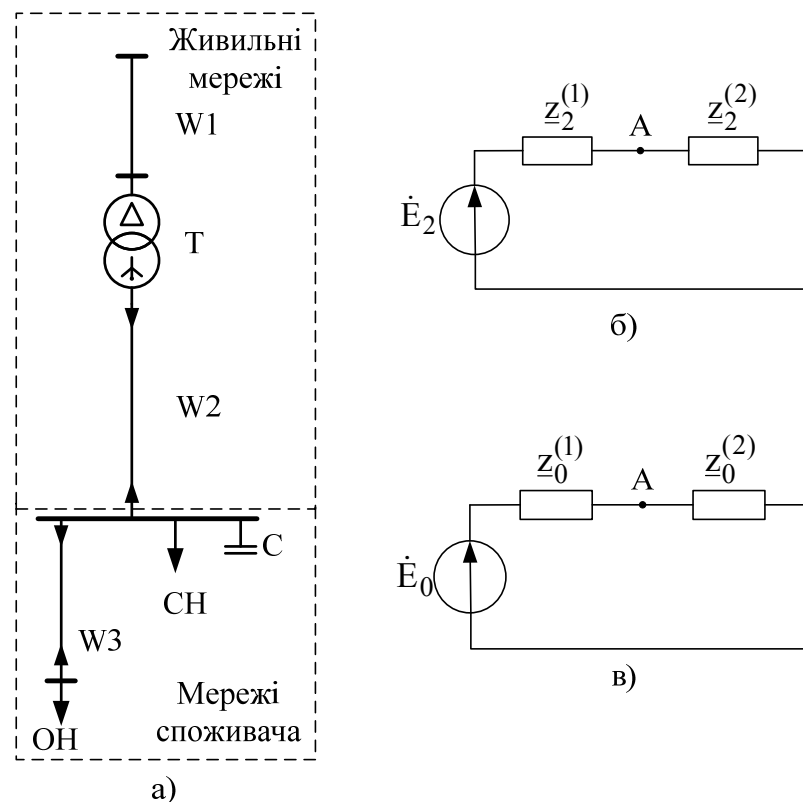


Рис. 2.1. Електрична схема живлення споживача та заступні схеми:

Для систем оберненої і нульової послідовностей, що володіють симетрією, опори $\underline{z}_2^{(1)}$; $\underline{z}_2^{(2)}$; $\underline{z}_0^{(1)}$; $\underline{z}_0^{(2)}$ зостаються активно-індуктивними, а струм будь-якої симетричної складової ємності зсунутий $\pi/2$ рад відносно відповідного вектора напруги, так само як і у випадку системи прямої послідовності). Для додатків напруги $\Delta\dot{U}_2$ та $\Delta\dot{U}_0$, справедливі співвідношення:

$$\Delta\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\dot{U}_{2до}}{U_{ном.ф}^2} \cdot \frac{\underline{z}_2^{(1)} \cdot \underline{z}_2^{(2)}}{\underline{z}_2^{(1)} + \underline{z}_2^{(2)}} \cdot \Delta Q_{ном} \quad (2.5)$$

$$\Delta\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\dot{U}_{0до}}{U_{ном.ф}^2} \cdot \frac{\underline{z}_0^{(1)} \cdot \underline{z}_0^{(2)}}{\underline{z}_0^{(1)} + \underline{z}_0^{(2)}} \cdot \Delta Q_{ном} \quad (2.6)$$

Величини $\Delta\dot{U}_2$ та $\Delta\dot{U}_0$ визначають впливи БК на несиметричність напруг. Як можна бачити з виразів (2.5) - (2.6) вони залежні від $\dot{U}_{2до}$; $\dot{U}_{0до}$; параметрів заступних схем $\underline{z}_2^{(1)}$; $\underline{z}_2^{(2)}$; $\underline{z}_0^{(1)}$; $\underline{z}_0^{(2)}$ та величини потужності $\Delta Q_{ном}$.

Аналіз впливу БК на несиметричність напруг слід провести на справжніх схемах, адже при цьому будуть дотримані реальні співвідношення між окремими параметрами електричної схеми та режимними параметрами і, як наслідок, можна дійти правильних висновків.

Оцінімо як поміняються значення напруг оберненої / нульової послідовностей після включення БК в залежності від їх вихідних значень для схем мереж споживача що показані на рис. 2.2 [14].

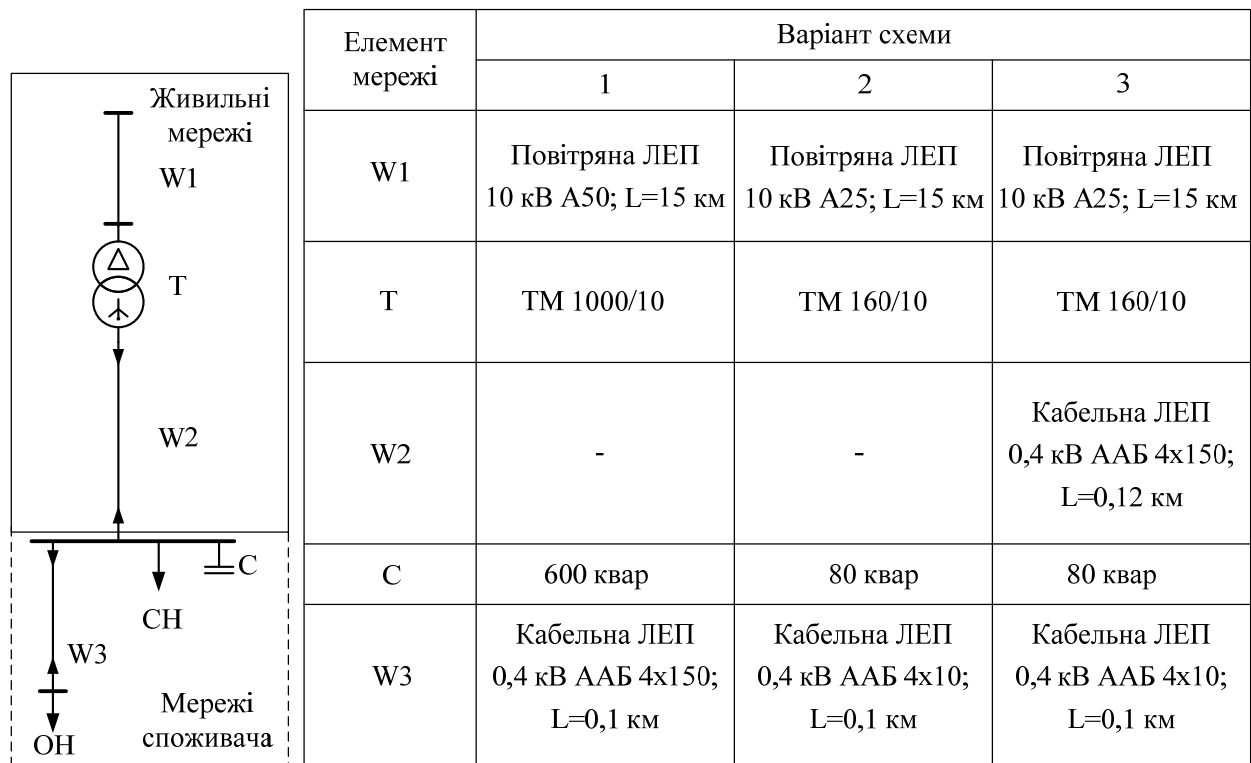
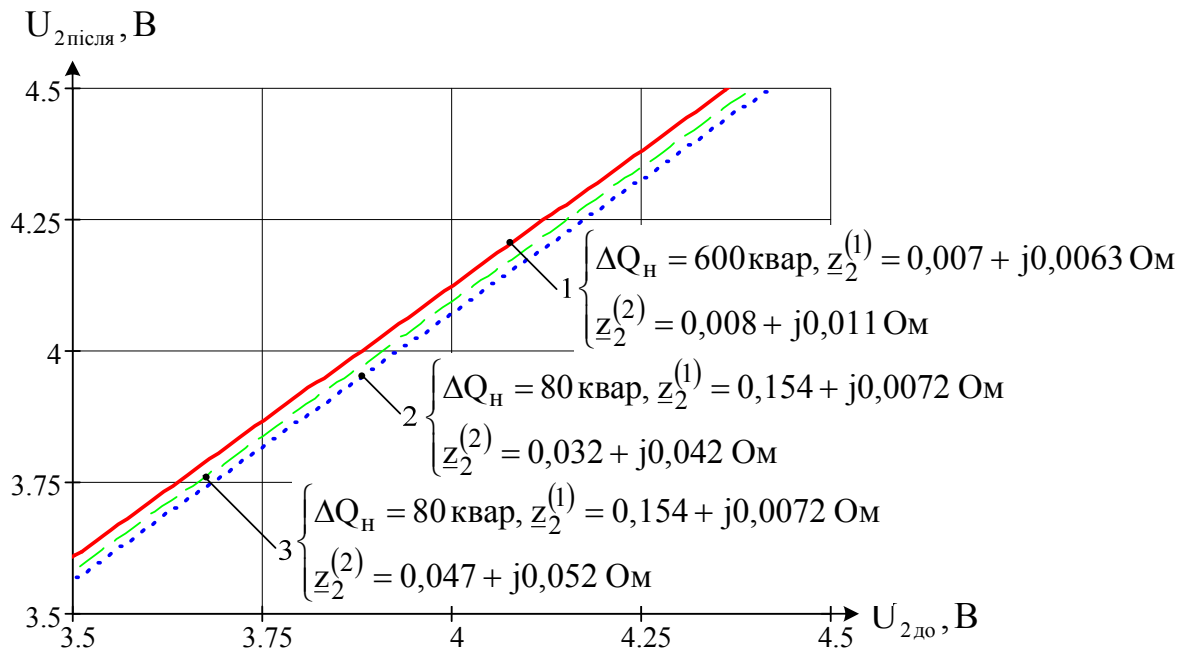


Рис. 2.2. Варіанти електричних схем мережі підприємства

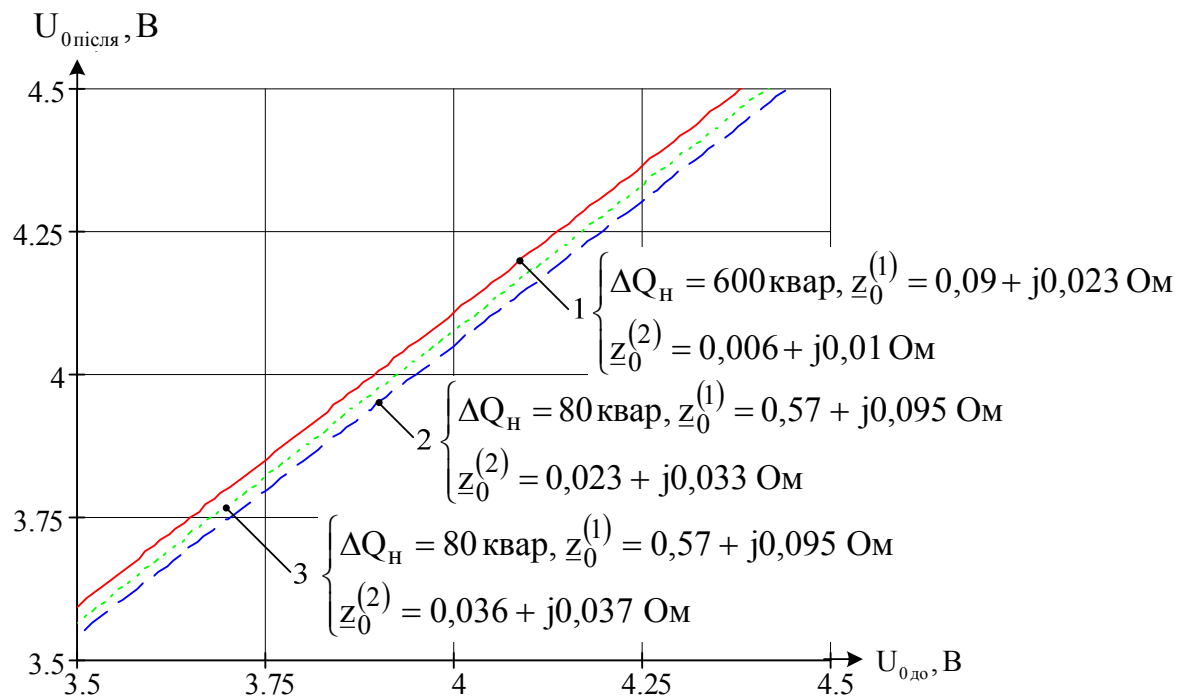
На рис. 2.3 у графічному вигляді представлені результати розрахунків.

Після аналізу даних графіків рис. 2.3 можна зауважити таке [14]:

- включення секцій БК у випадку несиметричності напруг призводить до росту значень U_2 та U_0 і за деяких умов (вихідний рівень $U_{2\text{до}}$, $U_{0\text{до}}$; значення потужності БК; опір зовнішньої електричної мережі) можуть стати більшими за допустимі значення – $U_{2\text{доп}}$, $U_{0\text{доп}}$, які можуть відповідати вимогам технологічного процесу або роботи обладнання;
- рівень несиметричності електричного режиму вимагає здійснення контролю в процесі управління реактивними навантаженнями.



а)



б)

1, 2, 3 – результати, отримані для варіанта схеми 1, 2, 3 рис. 2.2 відповідно

Рис. 2.3. Залежності: а) $U_{2\text{ після}}(U_{2\text{ до}})$; б) $U_{0\text{ після}}(U_{0\text{ до}})$:

Можливе виникнення таких режимів роботи, при яких несиметричність напруг лежить в допустимих межах, однак як наслідок втілення управляючих

рішень з КРН вийде за допустимі межі. Тому для запобігання вказаних ситуацій потрібно виконувати вибір управляючих рішень з оглядкою на технічні обмеження що до величини напруги оберненої / нульової послідовностей, які встановлюються після здійснення управляючого діяння. Логічним видається обмеження U_2 і U_0 такими значеннями, що відповідають унормованим коефіцієнтам несиметричності напруги по нульовій та по зворотній послідовностях. Іноді накладення обмежень на величину напруг U_2 і U_0 може здійснюватися виходячи із особливих умов техпроцесу або роботи електричного обладнання.

2.1.2 Уплив БК на величину додаткових утрат активної потужності.

Виділяють пару складових впливу БК на величину утрат активної потужності. Перша засвідчує, що несиметричність напруг збільшує загальну потужність БК (підраховану як суму по трьох фазах). Рівень компенсації РП збільшується, витрати активної потужності на передавання реактивних навантажень – зменшуються. Друга слідує із росту степеню несиметричності електричного режиму і відповідним цьому ростом додаткових утрат активної потужності, що спричинені струмами оберненої / нульової послідовностей. В роботі виконувалися дослідження другої складової.

Розділимо утрати активної потужності в лінії живлення, до якої підключене ОН (комплексні опори $\underline{z}_2^{(1)}; \underline{z}_0^{(1)}$) – $\Delta P'_2; \Delta P'_0$, рис. 2.1, та в електричних мережах споживача з СН а також живлячій системі (опори $\underline{z}_2^{(2)}; \underline{z}_0^{(2)}$) – $\Delta P''_2; \Delta P''_0$ [14, 15].

Утрати активної потужності, спричинені струмами оберненої послідовності визначаються за виразами:

$$\Delta P'_2 = 3 \cdot \frac{(E_2 - U_2)^2}{(z_2^{(1)})^2} \cdot r_2^{(1)} ;$$

$$\Delta P''_2 = 3 \cdot \frac{U_2^2}{(z_2^{(2)})^2} \cdot r_2^{(2)} .$$

Утрати активної потужності, спричинені струмами нульової послідовності визначаються за виразами:

$$\Delta P'_0 = 12 \cdot \frac{(E_0 - U_0)^2}{(z_0^{(1)})^2} \cdot r_0^{(1)} ,$$

$$\Delta P''_0 = \sum_{i=1}^n \left(12 \cdot \frac{U_0^2}{z_{0i}^2} \cdot r_{ли} + 3 \cdot \frac{U_0^2}{z_{0i}^2} \cdot r_{дi} \right) + 12 \cdot \frac{U_0^2}{z_{0W2}^2} \cdot r_{W2} + 3 \cdot \frac{U_0^2}{z_{0T}^2} \cdot r_{0T} ,$$

z_{0i} – повний опір для струмів нульової послідовності i -го фідера;

$r_{ли}$ – активний опір на одну фазу лінії i -го фідера;

$r_{дi}$ – активний опір для струмів нульової послідовності асинхронного двигуна, що підключений до i -го фідера;

n – число ліній, від яких живляться СН;

$z_{0W2} = r_{W2} + j \cdot x_{W2}$ – комплексний опір для струмів нульової послідовності лінії W_2 ;

$z_{0T} = r_{0T} + j \cdot x_{0T}$ – комплексний опір для струмів нульової послідовності трансформатора T .

З кількісної точки зору оцінити впливу, який виникає при включенні БК зі схемою з'єднання зірка з нулем, на всі складові утрат активної потужності,

виконаємо для частини реальної схеми електричної мережі 10 – 0,4 кВ. В колі рис. 2.2 (схема 1), до шин 0,4 кВ ТП підключена промислова будівля (цех) з компресорними установками. Привод компресорних установок здійснюється від асинхронного електроприводу потужністю 75 – 200 кВт. Визначимо утрати активної потужності до та після включення БК, якщо $U_{2\text{до}} = 4 \text{ В}$ і $k_{0U\text{до}} = 1,1 \text{ В}$. Результати підрахунків зведені в табл. 2.1.

Табл. 2.1 Результати підрахунків складових утрат активної потужності

Параметри	До включення БК	Після включення БК
Реактивна потужність на вході, квар	600	0
U_2 , В	4,000	4,120
U_0 , В	1,100	1,120
Складові утрат активної потужності, Вт:		
– передача реактивних навантажень	44880	0
– обернена послідовність в живлячій лінії з ОН	1240	1150
– обернена послідовність в мережах з СН та елементах мережі живлення	2010	2130
– нульова послідовність в лінії з ОН	1360	1340
– нульова послідовність в мережах з СН та складових елементах мережі живлення	460	490
– сумарні утрати, спричинені несиметричністю режиму, в лінії з ОН	2600	2490
– сумарні утрати, спричинені несиметричністю режиму напруги, в мережах з СН та елементах мережі живлення	2470	2620
Разом активні утрати, спричинені несиметричністю режиму, кВт	5070	5110

Отже, при включенні БК утрати активної потужності, спричинені несиметричністю режиму, де струми оберненої / нульової послідовностей направлені до вузла з БК, зменшуються, а де струми направлені до вузла - зростають. Встановлений характер поведінки додаткових утрат активної потужності спричинених несиметричністю режиму в окремих частинах електромережі можна пояснити на прикладі складові утрат $\Delta P'_2$ та $\Delta P''_2$. Якщо до включення БК напруга у точці А, рис. 2.1 б), (у точці підключення БК) була рівна $U_{2\text{до}}$, то при цьому протікали струми в опорах $\underline{z}_2^{(1)}$ та $\underline{z}_2^{(2)}$:

$$I_{2(z_2^{(1)})}^{\text{до}} = \frac{E_2 - U_{2\text{до}}}{z_2^{(1)}} \quad I_{2(z_2^{(2)})}^{\text{до}} = \frac{U_{2\text{до}}}{z_2^{(2)}}.$$

Після включення напруга у точці А стала $U_{2\text{після}}$, $U_{2\text{після}} > U_{2\text{до}}$, то

$$I_{2(z_2^{(1)})}^{\text{після}} = \frac{E_2 - U_{2\text{після}}}{z_2^{(1)}}, \quad I_{2(z_2^{(1)})}^{\text{після}} < I_{2(z_2^{(1)})}^{\text{до}} \quad \text{і} \quad \text{утрати} \quad \Delta P'_2 \quad \text{падають}$$

($\Delta P'_{2\text{після}} < \Delta P'_{2\text{до}}$).

Струм $I_{2(z_2^{(2)})}^{\text{після}} = \frac{U_{2\text{після}}}{z_2^{(2)}}$ росте і спричинені ним утрати $\Delta P''_2$ також ростуть ($\Delta P''_{2\text{після}} > \Delta P''_{2\text{до}}$).

В цілому добавочні утрати активної потужності від несиметричності режиму в мережі після включення БК для приведенного випадку прикладу більші.

З табл. 2.1 можна бачити, що зміна утрат активної потужності від несиметричності напруг порівняно із зміною утрат активної потужності спричинених передачею реактивної потужності мала.

2.1.3 Уплив БК на відхилення напруги та його специфіка. Під час передавання РП виникають утрати напруги, особливо значні в розподільних мережах енергокомапній та споживачів. Так при передачі активної і реактивної потужностей P і Q через складові елементи електромережі з еквівалентними активним та реактивним опорами r і x відповідно утрати напруги визначається:

$$U_{\Delta} = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_{\text{ном}}} = \frac{P \cdot r}{U_{\text{ном}}} + \frac{Q \cdot x}{U_{\text{ном}}} = U_{\Delta a} + \Delta U_{\Delta p},$$

$U_{\Delta a}$ – утрати напруги від протікання активної потужності;

$U_{\Delta p}$ – утрата напруги від протікання РП.

Складова $U_{\Delta p}$, яка визначається РП, приводить до зростання відхилення напруги на зажимах електроприймача. При включенні БК з величиною потужності ΔQ_n утрата напруги зменшується, внаслідок наявності постійного додатку напруги $U_{\Delta pk}$:

$$U'_{\Delta} = \frac{P \cdot r + (Q - \Delta Q_n) \cdot x}{U} = U_{\Delta a} + \Delta U_{\Delta p} - \Delta U_{\Delta pk}, \quad (2.7)$$

$$U_{\Delta} > \Delta U'_{\Delta}.$$

Для електроприймачів однофазного виконання стандарт ГОСТ 13109-97 нормує такий показник якості електричної енергії відхилення напруги. Для трифазних навантажень виникає потреба в контролі відхилення напруги по кожній фазі. Як було описано вище, БК в симетричних режимах мережі впливає на значення відхилення напруги [1, 5, 34]. Уплив БК у випадку їх підключення

на несиметричну напругу набуває нових рис і пов'язано це із залежністю від напруги потужності кожного плеча ввімкненої секції:

$$\Delta Q_{\text{факт}} = \Delta Q_{\text{н}} \left(\frac{U_{\text{факт}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (2.8)$$

$U_{\text{факт}}$, $U_{\text{ном}}$ – фактична і номінальна напруга відповідно на зажимах ввімкненого плеча БК;

$\Delta Q_{\text{факт}}$ – фактична потужність ввімкненого плеча БК, яка генерується при реальній напрузі.

Остання залежність є квадратичною. Значить при значенні відхилення напруги всього на +5% потужність БК зростає на цілих 10%.

При несиметричності напруг потужність кожного плеча БК буде різною і в результаті опиниться різною додаток напруги, що ним викликаний. У фазі з найбільшим значенням напруги додаток напруги теж буде найбільшим.

Під час експлуатації можуть виникати режими роботи, коли в результаті включення БК у фазі з найбільшим вихідним значенням напруги, створений додаток напруги призведе до того що відхилення напруги сягне неприпустимого рівня. Причому такий випадок може виникнути при задовільному рівні несиметричності напруг. Це підтверджується роботою реальних схем.

Для схеми 1 на рис. 2.2, та виміряних на шинах НН ТП параметрів режиму була проведена оцінка впливу БК потужністю 600 квар, з'єднану як в трикутник так і зірку, на відхилення напруги по всіх фазах а також на параметри несиметричності напруг. Результати приведені в табл. 2.2.

З отриманих можна пересвідчитися, що відхилення напруги по фазі А досягає неприпустимого рівня у випадках включення БК по обох схемах як трикутника, так і зірки з нулем (відповідно 5,14 % і 5,21 %). Напруги

оберненої / нульової послідовностей нижчі за допустимі (4,4 В), що встановлені нормованим значенням ГОСТ 13109-97 коефіцієнта несиметричності напруг по послідовностях. Тому управляюче рішення з компенсації РП для наведеного електричного режиму повинно обмежуватись впливом на величину відхилення напруги по фазі А.

Табл. 2.2. Уплив підключення БК на параметри якості електроенергії

Параметри	Без БК	Включення БК трикутником	Включення БК зіркою
$U_A, \text{В}$	224,47	231,01	231,47
$U_B, \text{В}$	215,07	221,85	221,73
$U_C, \text{В}$	217,52	224,33	224,33
$\delta U_{yA}, \%$	2,03	5,12	5,22
$\delta U_{yB}, \%$	-2,25	0,86	0,77
$\delta U_{yC}, \%$	-1,13	1,96	1,97
$U_2, \text{В}$	3,96	4,08	4,08
$U_0, \text{В}$	3,72	3,72	3,82

В табл. 2.2 величини δU_{yA} , δU_{yB} , δU_{yC} – відхилення напруги по фазах.

Як видно з даних табл. 2.2 показано можливість отримання ефекту, коли включення БК спричинює недопустиме відхилення напруги в одній із фаз при тому що в інших фазах ПЯЕ по несиметричності напруг в допустимих нормах. Для даного випадку слід виконувати контроль відхилення напруги в фазі де вихідна величини напруги була найбільша (фаза А).

2.2 Уплив, що здійснюється БК на режим роботи асинхронного двигуна

Найбільш вразливими від несиметричності напруг електроприймачами є асинхронні двигуни. Опір для струмів оберненої послідовності обмоток АД в 5 – 7 разів менше опору для струмів прямої послідовності [36, 37]. Тому навіть при невеликій несиметричності напруг в АД течуть порівняно великі струми оберненої послідовності. Вони спричиняють перегрів обмоток і передчасний їх вихід зі строю [32, 33, 37 – 39].

Дослідження характеристик АД при роботі його під несиметричною напругою присвячено багато наукових робіт. Всі дослідження спрямовані на оцінку збитків, викликаних несиметричністю режиму [1, 33], або на встановлення технічної можливості експлуатації АД за умов несиметричності. З метою управління параметрами електричного режиму, які впливають на параметри несиметричності важливим є дані про допустимі величини для параметрів, якими використовують для оцінки несиметричного режиму. За даних обставин використовується допустиме значення напруги по оберненої послідовності на зажимах АД – $U_{2\text{доп}}$. Під $U_{2\text{доп}}$ розумітимемо таке значення напруги оберненої послідовності, якому відповідає допустимий нагрів електричної машини. Відзначимо, що ряд параметрів якими визначається ступінь нагріву АД (фазні напруги, завантаження двигуна, температура оточуючого середовища) не стаціонарні. Тому величина $U_{2\text{доп}}$ також залежить від часу, чим викликається необхідність оперативного обрахування цього параметру в процесі управління.

Згідно ГОСТ 13109-97 несиметричність напруг підлягає нормуванню в точці підключення споживача до електромереж енергосистеми (далі по тексту точка 1) [12]. Але величина коефіцієнта несиметричності напруг по зворотній послідовності в пункті 1 – $k_{2U(1)}$ і в точках підключення АД до електромереж

споживача (далі по тексту точка 2) – $k_{2U(2)}$ можуть істотно відрізнятись. Якщо причиною несиметричності є однофазні електроприймачі підключені до мереж споживача, то $k_{2U(2)} > k_{2U(1)}$, а якщо з боку мережі енергопостачальної організації, то $k_{2U(2)} < k_{2U(1)}$.

Цілком зрозуміло, що використання для оперативного управління режимами електричного навантаження норм встановлені ГОСТ 13109-97 не завжди є можливим.

Наведемо також випадки, коли потрібно встановлювати допустимі рівні несиметричності напруг, які відмінні від встановлених ГОСТ 13109-97.

1. Нормування несиметричності напруг здійснено в припущенні, що спостерігається порушення встановлених норм лише за одним показником. Дія кількох спотворюючих факторів одночасно не береться до уваги, тому допустимі показники несиметричності напруг мають обґрунтовуватися.

2. Надійність роботи АД в складі імпортного технологічного обладнання, яке вироблене в країнах із вищими нормами якості електроенергії порівняно з ГОСТ 13109-97, буде замалою при їх роботі в електричних мережах України. Припустимі навантаження таких двигунів мають бути обґрунтовані виходячи із реальних рівнів несиметричності напруг в мережі.

3. Для малозавантажених АД необхідно обґрунтовувати $U_{2\text{доп}}$, яке чинить допустимими умови їх роботи.

Можливість оперативного визначення $U_{2\text{доп}}$ виступає однією із умов надійної роботи АД та забезпечення найбільшої ефективності оптимізуючих пристроїв. Припустима величина напруги оберненої послідовності у точці його підключення до мережі можна обчислити методом еквівалентних гріючих утрат [36] із умови нагріву ізоляційних матеріалів обмоток двигуна. Згаданий метод ґрунтується на принципі накладання перевищень температури, які викликані кожним видом утрат):

$$\Delta t_{m1} = k_{m1} \cdot \Delta P_{m1} + k_{ст} \cdot \Delta P_{ст} + k_{m2} \cdot \Delta P_{m2} + k_{мех} \cdot \Delta P_{мех} + k_{д} \cdot \Delta P_{дод}, \quad (2.9)$$

Δt_{m1} – перевищення температури обмотки над температурою навколишнього повітря;

k_{m1} , k_{m2} , $k_{ст}$, $k_{мех}$, $k_{д}$ – коефіцієнти, які використовуються для характеристики впливу на нагрів статорної обмотки активних утрат в провідниках обмоток статора, ротора, утрат в сталі магнітопровода, механічних а також додаткових утрат;

ΔP_{m1} , ΔP_{m2} – утрати активної потужності в провідниках обмоток статорної та роторної обмотки;

$\Delta P_{ст}$ – утрати активної потужності в магнітопроводі сталі;

$\Delta P_{мех}$ – механічні утрати;

$\Delta P_{дод}$ – добавочні утрати в двигуні.

Коефіцієнти k_{m1} , k_{m2} , $k_{ст}$, $k_{мех}$, $k_{д}$ можливо розрахувати на основі експериментальних даних або як функції від основних геометричних розмірів осердя і корпусу двигуна та частоти обертання.

Утрати $\Delta P_{ст}$, $\Delta P_{мех}$ відносять до постійних складових утрат. Додаткові утрати $\Delta P_{дод}$ за величиною малі [36, 37] і ними можна знехтувати. Напряга U_2 у точці підключення АД істотно впливає на утрати в провідниках обмоток статора і ротора, адже опір для струмів оберненої послідовності занижений.

Призначення методу еквівалентних гріючих утрат – це визначення температури АД при його роботі у випадку симетричної напруги. За даним методом можна визначити $U_{2доп}$, якщо проводити розрахунки нагріву АД від симетричної трифазної системи струмів, яка фіктивна насправді. Струм кожної фази буде рівний максимальній величині струму реальної несиметричної

системи струмів. Получені результати визначення температури та $U_{2\text{доп}}$ будуть завжди перебільшеними.

Утрати в статорній та роторній обмотках АД пропорційні квадрату струмів, що течуть в цих обмотках відповідно:

$$\Delta P_{m1} = 3 \cdot m_T \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 3 \cdot m_T \cdot \left| \dot{I}_1^{(1)} + \dot{I}_1^{(2)} \right|^2 \cdot r_1; \quad (2.10)$$

$$\Delta P_{m2} = 3 \cdot m_T \cdot I_2^2 \cdot r_2 = 3 \cdot m_T \cdot \left| \dot{I}_2^{(1)} + \dot{I}_2^{(2)} \right|^2 \cdot r_2, \quad (2.11)$$

m_T – коефіцієнт приведення до розрахункової температури, враховує клас стійкості обмоток АД до нагріву;

I_1, I_2 – струми обмоток статора та ротора;

$\dot{I}_1^{(1)}, \dot{I}_1^{(2)}, \dot{I}_2^{(1)}, \dot{I}_2^{(2)}$ – вектори струмів прямої та оберненої послідовностей обмоток статора та ротора у тій фазі, для якої різниця фаз $\arg(\dot{I}_1^{(1)}) - \arg(\dot{I}_1^{(2)})$ та $\arg(\dot{I}_2^{(1)}) - \arg(\dot{I}_2^{(2)})$ має менше значення та що рахуються за виразами:

$$\dot{I}_1^{(1)} = \frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)}}; \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_1^{(2)} = \frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\underline{Z}^{(2)}}; \quad (2.13)$$

$$\dot{I}_2^{(1)} = \frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\left(r_1 + \frac{r_2^{(1)}}{s} \right) + j \cdot (x_1 + x_2^{(1)})} ; \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_2^{(2)} = \frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\left(r_1 + \frac{r_2^{(2)}}{2-s} \right) + j \cdot (x_1 + x_2^{(2)})} , \quad (2.15)$$

$\dot{U}_1^{(1)}, \dot{U}_1^{(2)}$ – лінійні напруги прямої і оберненої послідовностей;

r_1, x_1 – активний та реактивний опори провідників обмоток статора;

$r_2^{(1)}, r_2^{(2)}, x_2^{(1)}, x_2^{(2)}$ – активний та реактивний опори провідників обмоток ротора для струмів прямої та оберненої послідовностей;

$\underline{z}^{(1)}, \underline{z}^{(2)}$ – комплексний опір АД для струмів прямої та оберненої послідовностей;

s – ковзання.

Значення $r_2^{(1)}$ і $x_2^{(1)}$ відмінні від $r_2^{(2)}$ і $x_2^{(2)}$ внаслідок ефекту витіснення струму в роторі до бічної поверхні при робочих ковзаннях $0 < s \leq s_H$ [87].

Підстановкою формул (2.12) – (2.15) в (2.10) – (2.12), а останні в (2.9), виведемо залежність $\Delta t_{m1}(\dot{U}_1^{(2)})$:

$$\begin{aligned} \Delta t_{m1}(\dot{U}_1^{(2)}) = & k_{m1} \cdot \Delta P_{m1}(\dot{U}_1^{(2)}) + k_{ст} \cdot \Delta P_{ст} + k_{m2} \cdot \Delta P_{m2}(\dot{U}_1^{(2)}) + \\ & + k_{мех} \cdot \Delta P_{мех} + k_{д} \cdot \Delta P_{дод}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Якщо урівняти вираз у правій частині (2.16) до припустимої температури перевищення над температурою навколишнього повітря можливо відшукати як модуль, так і фазу $\dot{U}_{2\text{доп}}$.

Для реалізації ефективного управління електричними режимами роботи за допомогою КБ потрібно мати інформацію як про модуль $U_{2\text{доп}}$, так і про її фазу.

Виконаємо побудову залежності перевищення температури провідників обмоток АД від кута напруги оберненої послідовності в полярній системі координат.

З рис. 2.4 можна побачити, що при різних величинах кута напруги оберненої послідовності провідники обмоток АД піддаються нагріву неоднаково. Максимальне перевищення температури провідників обмоток АД спостерігається у випадку максимального струму в одній із обмоток (кути струмів прямої та оберненої послідовностей рівні):

$$\arg(\dot{I}_1^{(1)}) = \arg(\dot{I}_1^{(2)}) \quad (2.17)$$

Із рівнянь (2.12) – (2.13), зважаючи (2.17), витікає:

$$\arg\left(\frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)}}\right) = \arg\left(\frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\underline{Z}^{(2)}}\right),$$

тобто максимальне перевищення температури провідників обмоток АД будемо мати у випадку, коли різниця кутів між напругою прямої та оберненої послідовності рівна різниці кутів опорів АД для струмів прямої та оберненої послідовностей:

$$\arg(\dot{U}_1^{(1)}) - \arg(\dot{U}_1^{(2)}) = \arg(\underline{z}^{(1)}) - \arg(\underline{z}^{(2)}) \quad (2.18)$$

Відмітимо, що значення правої частини рівняння (2.18) змінюється в залежності від коефіцієнта завантаження АД, тобто фактично від ковзання.

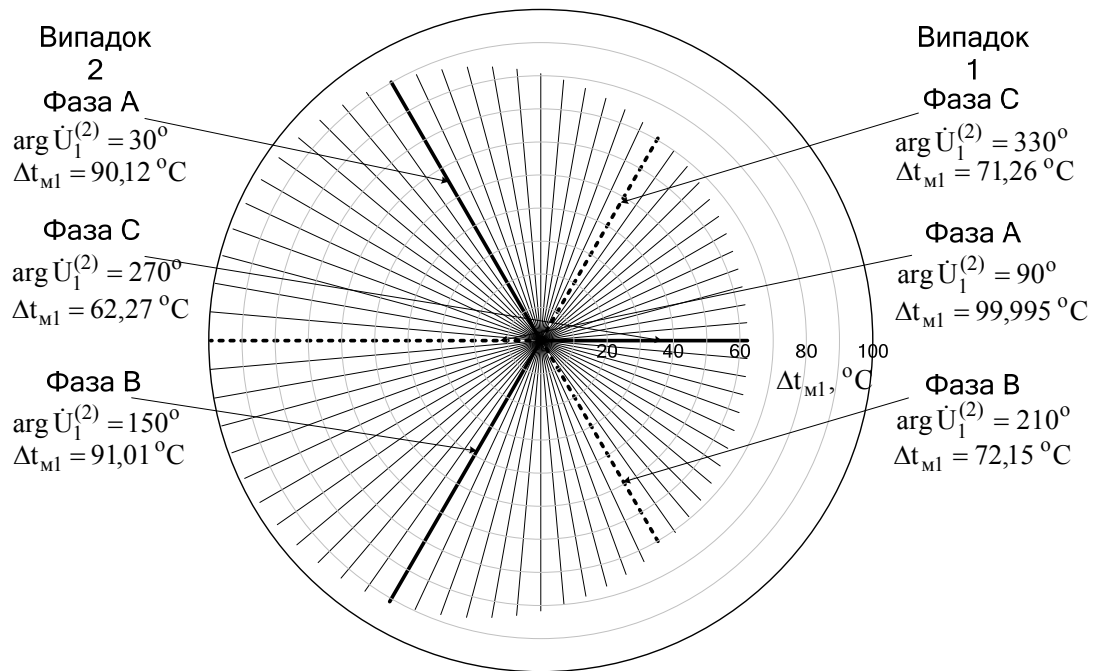


Рис. 2.4. Залежність перевищення температури провідників обмоток АД від кута напруги оберненої послідовності

Відмітимо, що кут напруги оберненої послідовності істотно впливає на значення $U_{1\text{доп}}^{(2)}$, що було визначене із умов припустимого температурного нагріву ізоляції провідників обмоток АД.

2.3 Оцінки впливу БК на несиметричність напруг у точці підключення та його показники

З метою оцінки якості електроенергії та ефективного примінення технічних засобів користуються системою показників визначених в ГОСТ

13109-97 [12]. Несиметричність напруг вказаним стандартом нормується за допомогою двох показників: коефіцієнт несиметричності напруг по зворотній та нульовій послідовностям $-k_{2U}$, k_{0U} . Вони обчислюються як результат ділення напруги оберненої послідовності $-U_2$ та нульової $-U_0$ на величину напруги прямої послідовності $-U_1$. У наближених розрахунках ГОСТ 13109-97 дозволяє визначати ці показники як результат ділення U_2 та U_0 до номінальної напруги $-U_{ном}$. З технічних міркувань для k_{2U} та k_{0U} визначені допустимі значення.

Іноді для обґрунтування технічних рішень приміняють напруги оберненої та нульової послідовностей. В проектувальних задачах величини цих напруг обмежують значеннями відповідними нормованим величинам k_{2U} та k_{0U} чи ж жорсткішим вимогам технологічного процесу. В якості критерію ефективності можуть бути прийняті добавочні утрати активної потужності, для прикладу, в лінії живлення, спричинені несиметричністю режиму $-\Delta P$.

Реалізація любых технічних рішень, результатом яких стає зменшення (збільшення) збитків від несиметричності електричного режиму має позначитися на зміні величини показника, який використаний для оцінки.

Розглянемо як міняються показники оцінки несиметричності режиму, при включенні БК до мережі в тій її точці, де напруга несиметрична для схеми, показаної на рис. 2.5.

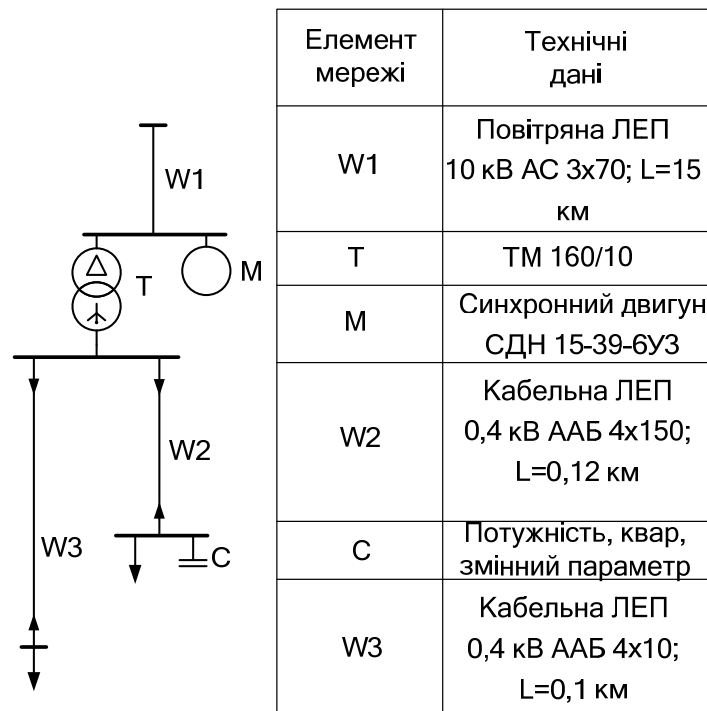


Рис. 2.5. Схема досліджуваної ділянки електричної мережі

1. Збитки від несиметричності режиму складаються з кількох частин [13]. Однак їх оцінку можна зробити лише наближено. Для встановлення характеру зміни збитків при включенні БК врахуємо лише відносно значення збитків від додаткових утрат активної потужності та скорочення терміну роботи ізоляції:

$$З_* = \frac{З^{після}}{З^{до}},$$

$З^{до}$, $З^{після}$ – грошові збитки до та після включення БК.

Получені результати наведені в табл. 2.4 та рис. 2.11 – 2.13 лінією 1.

2. Додаткові утрати активної потужності, спричинені несиметричністю режиму мережах споживача і живлення визначаються:

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P_2^{після} + \Delta P_0^{після}}{\Delta P_2^{до} + \Delta P_0^{до}},$$

$\Delta P_2^{\text{після}}$, $\Delta P_0^{\text{після}}$ – добавочні утрати активної потужності, спричинені зворотними та нульовими послідовностями струмів, після включення БК;

$\Delta P_2^{\text{до}}$, $\Delta P_0^{\text{до}}$ – вихідні значення додаткових утрат активної потужності, викликані зворотними і нульовими послідовностями струмів, до включення БК.

Получені результати показані на рис. 2.11 – 2.13 лінією 2.

3. Напруги оберненої та нульової послідовностей після включення БК у точці їх підключення до мережі залежать від начального значення рис. 2.3 та потужності ввімкнених секцій БК. Результати дослідження залежностей U_2 та U_0 від величини потужності БК, яка працює у випадку несиметричності напруг, показані на рис. 2.11 – 2.13 лініями 3 – U_{2*} та 4 – U_{0*} :

$$U_{2*} = \frac{U_2^{\text{після}}}{U_2^{\text{до}}}; \quad U_{0*} = \frac{U_0^{\text{після}}}{U_0^{\text{до}}},$$

де $U_2^{\text{до}}$, $U_2^{\text{після}}$ – напруги оберненої послідовності у точці підключення БК до та після її включення;

$U_0^{\text{до}}$, $U_0^{\text{після}}$ – напруги нульової послідовності у точці підключення БК до та після її включення.

4. Коефіцієнти несиметричності напруг по оберненій та нульовій послідовності. Проаналізуємо зміну k_{2U} та k_{0U} для випадків, коли вони розраховуються як відношення відповідних напруг до напруги прямої послідовності U_1 (далі вони позначені k'_{2U} ; k'_{0U}), так і до номінальної напруги $U_{\text{ном}}$ (далі – k''_{2U} ; k''_{0U}):

$$k'_{2U*} = \frac{k'_{2U}^{\text{після}}}{k'_{2U}^{\text{до}}} ; \quad k'_{0U*} = \frac{k'_{0U}^{\text{після}}}{k'_{0U}^{\text{до}}} ;$$

$$k''_{2U*} = \frac{k''_{2U}^{\text{після}}}{k''_{2U}^{\text{до}}} ; \quad k''_{0U*} = \frac{k''_{0U}^{\text{після}}}{k''_{0U}^{\text{до}}} ,$$

$k'_{2U}^{\text{після}}$, $k'_{2U}^{\text{до}}$ – коефіцієнти несиметричності напруг по зворотній послідовності k'_{2U} після та до включення БК;

$k''_{2U}^{\text{після}}$, $k''_{2U}^{\text{до}}$ – коефіцієнти несиметричності напруг k''_{2U} після та до включення БК;

$k'_{0U}^{\text{після}}$, $k'_{0U}^{\text{до}}$, $k''_{0U}^{\text{після}}$, $k''_{0U}^{\text{до}}$ – значення k'_{0U} та k''_{0U} після і до включення БК.

Прийнявши $z_1 = z_2$, і зауваживши (2.1); (2.2) та (2.7); (2.8), для схеми рис. 2.8 будемо мати $k'_{2U*} = 1$. Фізично це пояснюється тим, що при включенні БК одночасно із додатком напруги оберненої послідовності має місце додаток напруги прямої послідовності, значення яких рівні (у відносних одиницях). Таким чином, якщо технічний розв'язок змінює напругу оберненої та прямої послідовностей, то показник k'_{2U} неможна використовувати з метою кількісної оцінки впливу на режим оберненої послідовності. Деяке спотворення здійснюється при оцінюванні впливу за показником k'_{2U} і в схемах рис. 2.6 та рис. 2.9.

Оцінювання впливу на режим нульової послідовності при включеній БК допомогою k'_{0U} буде спотвореною також. Однак оскільки $z_0 \neq z_1$, то завжди $k'_{0U}^{\text{після}} \neq k'_{0U}^{\text{до}}$. Зауважимо, що у даному випадку, на величину k'_{0U} впливає зміна напруги U_1 , яка не може характеризувати режим нульової послідовності. Саме тому k'_{0U} як і k'_{2U} використовувати з метою оцінки результатів втілення

технічного рішення можна лише із зауваженням що вони неадекватно оцінюють рівень зміни несиметричності режиму.

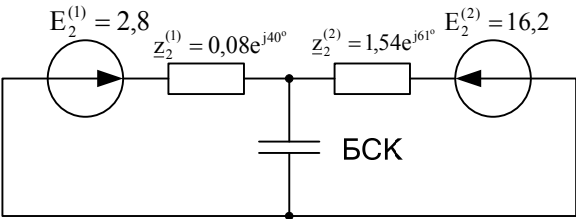
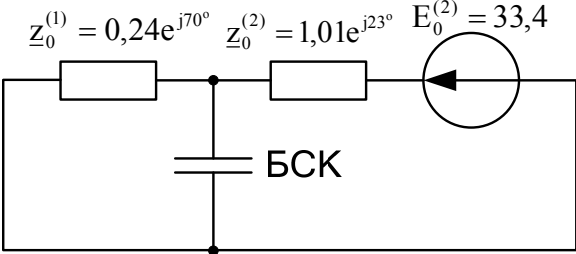
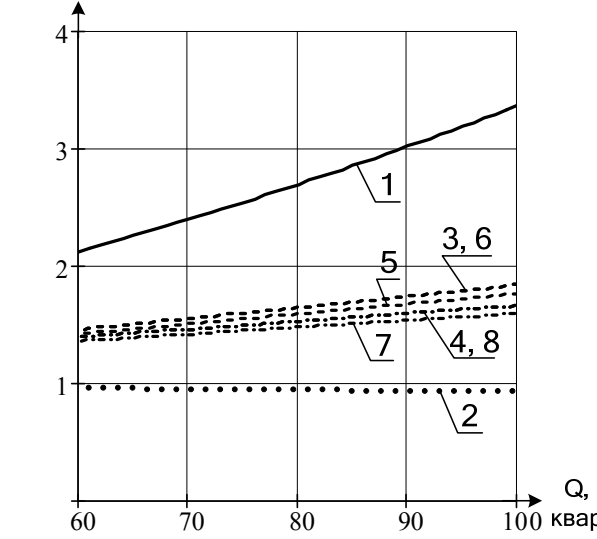
Графіки зміни показників k'_{2U*} , k''_{2U*} , k'_{0U*} , k''_{0U*} показані на рис. 2.11 – 2.13 відповідно лініями 5, 6, 7, 8.

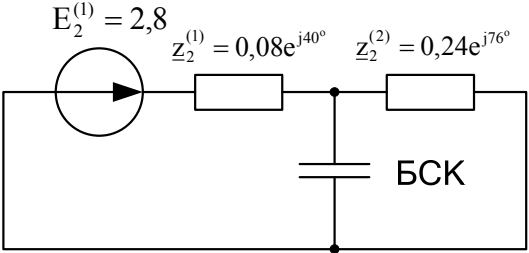
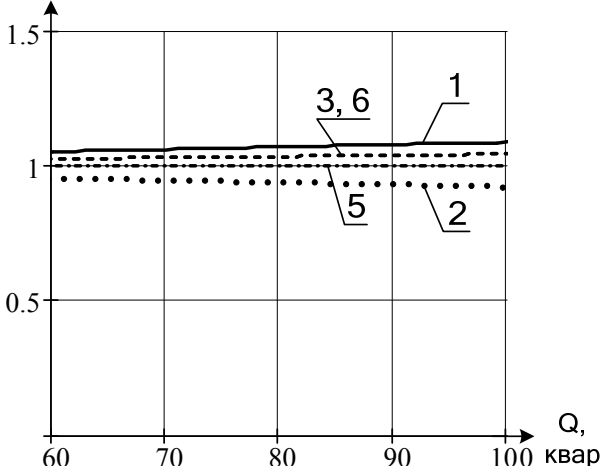
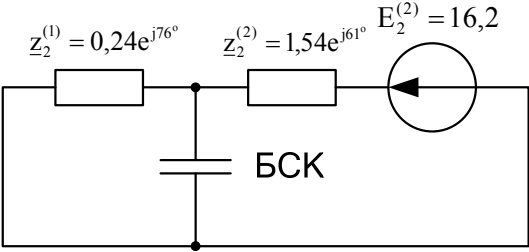
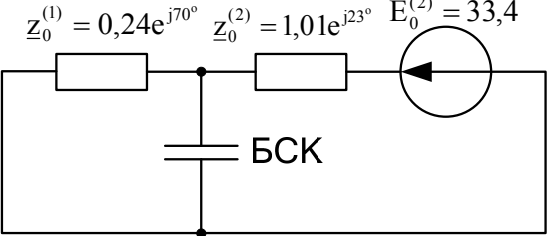
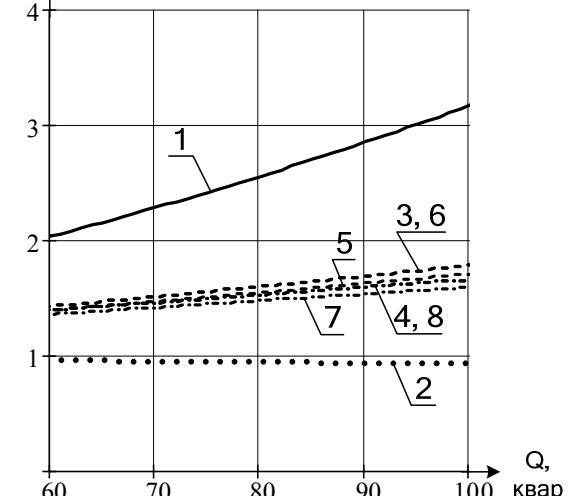
Із аналізу рис. 2.11 – 2.13 слідує, що на показники несиметричності режиму впливає потужність БК.

У разі підключення БК у віддалених від несиметричних навантажень вузлах, показник ΔP_* не може віддзеркалювати негативні впливи на електричні режими. Разом із ростом несиметричності напруги утрати ΔP_* знижуються (рис. 2.11 – 2.13). Цю обставину можна врахувати під час оцінки зменшення загальних утрат потужності при включенні БК. Однак це робити ватро лише у випадку якщо показники несиметричності режиму лежать в допустимих межах.

У практичній діяльності можуть виникати електричні режими, які вимагають накладати обмеження на ріст несиметричності при включенні зважаючи на технічні або технологічні вимоги. Виконати ці вимоги можна якщо використовувати показники несиметричності режиму U_2 і U_0 або k''_{2U} (схема зірка) чи U_2 або k''_{2U} (схема трикутника). Згадані показники в основному відображають тренд зміни збитків від несиметричності режиму.

Табл. 2.4. Аналіз характеру режимних показників несиметричності

Характеристика вихідної схеми та схема заміщення	Графіки зміни показників, якими оцінюється несиметричність режиму
1 1. БК підключається до шин 0,4 кВ ТП. Несиметричність режиму обумовлена несиметричними споживачами в мережах живлення споживача.  Рис. 2.6. Схема заміщення для струмів оберненої послідовності: $E_2^{(1)}$, $E_2^{(2)}$ – результуючі е.р.с. оберненої послідовності в живильних та розподільних мережах, В.  Рис. 2.7. Схема заміщення для струмів нульової послідовності: $E_0^{(2)}$ – результуюча е.р.с. нульової послідовності в розподільчих мережах, В.	2 $3_*, \Delta P_*, U_{2*}, U_{0*}, k'_{2U*}, k''_{2U*}, k'_{0U*}, k''_{0U*}$  Рис. 2.11. Залежності показників оцінки несиметричності режиму, від потужності БК для схем рис. 2.6 та 2.7: 1 – функція $3_*(Q)$; 2 – функція $\Delta P_*(Q)$; 3 – функція $U_{2*}(Q)$; 4 – функція $U_{0*}(Q)$; 5 – функція $k'_{2U*}(Q)$; 6 – функція $k''_{2U*}(Q)$; 7 – функція $k'_{0U*}(Q)$; 8 – функція $k''_{0U*}(Q)$

1	2
2. БК підключена до шин 10 кВ ТП. Несиметричність режиму обумовлена е.р.с. оберненої послідовності в мережах живлення  Рис. 2.8. Схема заміщення для струмів оберненої послідовності	$3_*, \Delta P_*, U_{2*}, k'_{2U*}, k''_{2U*}$  Рис. 2.12. Залежності показників для схеми рис. 2.8
3. БК підключена до шин 0,4 кВ ТП. несиметричність режиму обумовлена навантаженнями споживача  Рис. 2.9 – Схема заміщення для струмів оберненої послідовності  Рис. 2.10 – Схема заміщення для струмів нульової послідовності	$3_*, \Delta P_*, U_{2*}, U_{0*}, k'_{2U*}, k''_{2U*}, k'_{0U*}, k''_{0U*}$  Рис. 2.13. Залежності показників оцінки несиметричність режиму, від потужності БК для схем рис. 2.9 та 2.10

2.4 Висновки за другим розділом

1. Включення БК, яке здійснюється при управлінні реактивним навантаженням, призводить до зростання напруг оберненої та нульової послідовностей, а також відхилення напруги, що інколи супроводжуватиметься перевищенням їх допустимих значень.

2. Уплив БК на режим роботи потрібно визначати із врахуванням значення відхилення напруги, напруги оберненої та нульової послідовностей у точці їх підключення, потужності БК, опору мережі живлення.

3. Включення БК в цілому змінює утрати активної потужності, спричинені несиметричністю режиму. В частинах мережі, де струми оберненої та нульової послідовностей спрямовані до вузла підключення БК, добавочні утрати активної потужності від несиметричності напруг знижуються, а в іншій, де струми мають другий напрямок, збільшуються. Зміна додаткових утрат від несиметричності режиму становить невеликий відсоток порівняно із зниженням активних утрат від передачі реактивної потужності.

4. Оптимальне управління реактивним навантаженням у випадку несиметричності напруг ватро втілювати з використанням як критеріїв ефективності коефіцієнти несиметричності напруг по оберненій та нульовій послідовності, розраховані як частка від ділення на номінальну напругу) або напруги оберненої та нульової послідовності, які найліпше відображають тренд зміни збитків від несиметричності режиму.

5. Обмеження на граничні величини параметрів, за допомогою яких оцінюється несиметричність напруг, можливо розрахувати із умови припустимого нагрівання двигуна за розробленим методом.

6. Для збільшення ефективності управління РП в реальному масштабі часу за допомогою БК, уникаючи негативних результатів, що обумовлені несиметричністю режиму, потрібно розробити математичні моделі для вироблення керуючих рішень, які враховують всі важливі чинники.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ЗА УМОВ НЕСИМЕТРИЧНОСТІ

В електричних мережах може виникати необхідність управління реактивним навантаженням із урахуванням їх впливів на відхилення напруги в одній із фаз електромережі та величини оберненої і нульової послідовностей та. Дана функція не здійснюється ніяким пристроєм ні українського ні іноземного виробництва. Керуючі рішення без урахування означених впливів супроводжуватимуться порушенням вимог нормованих ГОСТ 13109-97 або умовами що висуваються технологією роботи приймачів.

В цьому розділі створені матмоделі управління РП для випадків:

- секції БК скомпоновані у вигляді схеми трикутника;
- коли кожна секція БК може працювати у вигляді схеми трикутника та зірки.

Розроблені матмоделі можливо використовувати СПР в поєднанні із іншими матмоделями або самостійно. Алгоритм роботи такої СПР передбачає попередню оцінку показників поточного електричного режиму, і за мат моделлю що ураховує весь перелік впливових чинників обрахувати вектор управління. Система управління, що так функціонує, володітиме високими техніко-економічними характеристиками і забезпечуватиме ефективне управління РП при повному використанні наявних БК.

Для аналізу матмоделей розроблено обчислювальний метод, працездатність якого ілюструється на чисельних прикладах.

3.1 Постановка завдання оптимального управління реактивними навантаженнями та шляхи його рішення, реалізований в роботі

Задача оптимального управління заключається в відшуванні такого n -вимірного вектора управління $\mathbf{X}(t)$ за час t , який забезпечує екстремальне значення певного показника якості управління (ПЯУ) – I , наприклад,

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F[\mathbf{W}(t), \mathbf{X}(t), t] dt$$

$\mathbf{W}$ – m -вимірний вектор станових параметрів об'єкта управління.

Задача може вирішуватись навіть якщо існують технічні обмеження різного характеру:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = f_i[\mathbf{W}(t), \mathbf{X}(t), t], \quad i=1, 2, 3, \dots, m,$$

де W_i – i -ий елемент вектора станових параметрів [40, 41].

Серед підходів до рішення задачі оптимального управління є такий. Задача оптимального управління для випадку неперервної системи утворює задачу математичного програмування в просторі безкінечної розмірності і її рішення заключається в формулюванні та розв'язанні послідовності подібних задач [42].

Керований параметр стану електромережі розглядуваний в роботі – РП представляє неперервну функцію часу $Q(t)$. Динамічні властивості цього параметру в символічному вигляді описуються рівнянням

$$Q = f[Q'(t), \mathbf{X}(t), t],$$

Q' – РП, яка відповідає природному споживанню (без урахування впливу засобів КРН).

В [25] запропоновано ПЯУ для оптимального управління графіком РП, яке забезпечує графік заданий енергосистемою:

$$\int_{t_1}^{t_N} Q[Q'(t), X(t), t] dt \rightarrow \min$$

t_1 – початковий момент часу;

t_N – кінцевий нефіксований момент часу.

Фізична суть ПЯУ – реактивна електроенергія, спожита за проміжок часу $(t_N - t_1)$. Даний показник також можна інтерпретувати з економічної точки зору. Він пропорційний оплаті за спожиту реактивну електроенергію. Таким чином, наведений ПЯУ можна використати для оптимального управління реактивним навантаженням.

Неперервну функцію $Q'(t)$ під знаком інтеграла з певним наближенням можна замінити ступінчатою з тривалістю ступеней Δt , рис. 3.1. Для такої функції ПЯУ можна записати:

$$\sum_{\varepsilon=1}^{(N-1)} Q[Q'(t_\varepsilon), X(t_\varepsilon)] \Delta t \rightarrow \min$$

ε – дискретний момент часу.

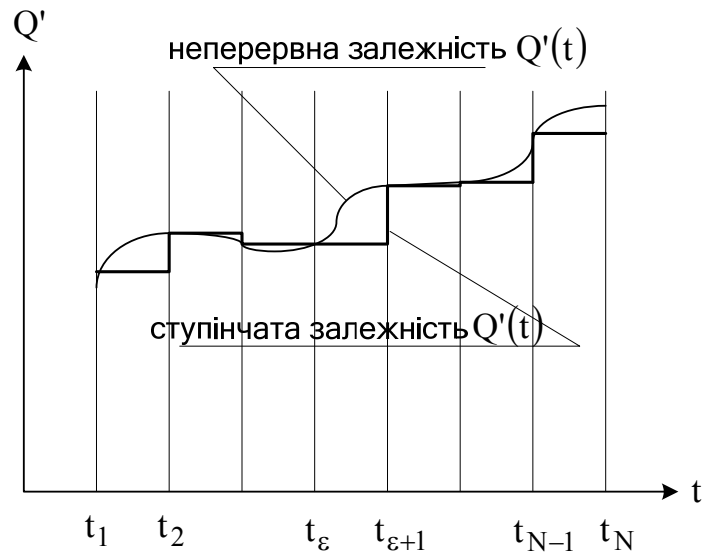


Рис. 3.1 Представлення графіка $Q'(t)$ у неперервному та ступінчастому виді

Якщо аналогічно підійти до обмежень, що задають додаткові умови рішення, то в загальному задачу оптимального управління реактивним навантаженням можна представити:

$$\begin{cases} \sum_{\varepsilon=1}^{(N-1)} Q[Q'(t_{\varepsilon}), \mathbf{X}(t_{\varepsilon})] \Delta t \rightarrow \min \\ \mathbf{g}[\mathbf{h}(t_{\varepsilon}), \mathbf{X}(t_{\varepsilon})] \geq 0, \end{cases}$$

$\mathbf{g}$ – векторна функція;

$\mathbf{h}$ – вектор станових параметрів керованої системи.

Якщо в дискретизовані моменти часу t_{ε} здійснювати обрахунок та реалізацію вектора управління підтримуючи при цьому мінімальну величину Q' , то можливо мінімізувати площу під ступінчатою залежністю $Q'(t)$. На підтримку обраного способу рішення задачі оптимального управління реактивним навантаженням варто відзначити те, що під час функціонування електромережі перелік параметрів, які підлягають контролю, а також допустимі рівні деяких параметрів міняються. Внаслідок цього міняються і технічні

обмеження. Для кожного t_ε вектор $\mathbf{X}(t_\varepsilon)$ можливо знаходити за відповідною матмоделлю, яка враховує найбільш суттєві впливи на електричний режим.

3.2 Технічні обмеження вироблення керуючих рішень та підґрунтя вибору критерію ефективності

СЕП є складною кібернетичною системою. БК, що примінюються для оптимізації станових параметрів об'єкта управління, створюють складний вплив на режими роботи. Тому вони вважаються мультизадачними пристроями. Задача яка ставиться є оптимізаційною з багатьма критеріями. Оптимізаційною задачу слід вважати, бо вона має багато рішень. Такого роду задачі можна вирішувати лише коли визначений критерій ефективності. Для випадку підключення БК до несиметричної напруги таких критеріїв можна кілька запропонувати.

Критерії для оцінки рівня компенсації РП:

- РП в лінії живлення;
- утрати активної потужності, спричинені реактивним навантаженням.

Як засвідчили проведені попередні дослідження критерій, що дає оцінку впливу на напругу – це відхилення напруги у фазі з найбільшим значенням напруги.

За результатами проведеного раніше дослідження критерії, що дають оцінку ступеню впливу БК на несиметричність напруг:

- напруга оберненої послідовності у точці підключення БК;
- те саме, для напруги нульової послідовності.

Для рішення застосуємо метод субоптимізації [43]. Він дає можливість відшукати рішення багатокритеріальної задачі. Метод полягає в тому, що один з критеріїв призначається головним, для нього здійснюється аналітичне описування, а получена функція застосовується в якості цільової в

математичній моделі. Для усіх інших критеріїв встановлюються межові значення, які являють собою обмеження моделі.

Основним призначенням розглядуваних в роботі БК слугує компенсація реактивних навантажень, то в якості критерію ефективності можна обрати величину РП в живлячій лінії. Необхідна інформація – величини потужності секцій БК, які відповідають величині номінальної напруги, та параметри електричного режиму: значення РП, яке споживається, та дійсні фазні і між фазні напруги в точці підключення БК.

В енергетичному плані повному ступеню КРН ($Q = 0$) відповідатиме мінімум втрат активної потужності, які витрачаються на передачу по живильним мережам РП.

Обраний критерій ефективності описується функцією цілі:

$$Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min ,$$

$\Delta Q(U)$ – матриця потужностей управляємих секцій БК що знаходяться в функціональній залежності від лінійних (при сполученні секцій у вигляді схеми трикутника) або фазних напруг (при сполученні секцій у вигляді схеми зірки), розмірністю $(m \times 1)$, де m – кількість секцій БК;

$\mathbf{X}$ – вектор управління розмірністю $(m \times 1)$, кожна складова якого описує стан комутуючого апарату, яким виконується комутація відповідної секції БК; якщо $x_i = 1$, то секція i має бути включена, а якщо $x_i = 0$, то виключена;

U – напруга у точці підключення БК, яка встановиться в результаті реалізації вектора $\mathbf{X}$ (лінійна при сполученні БК в трикутник та фазна при сполученні в зірку);

T – індекс транспонування.

Кожна матмодель містить актуальну для часу прийняття управляючого рішення систему обмежень. Урахування всіх чинників в рамках однієї

матмоделі збільшує трудоемкість обчислень, вимагає великої апаратної потужності при мікропроцесорній реалізації тому недоцільна.

Наведемо обмеження, типові для найпоширеніших випадків рішення задачі КРН.

1. Мінімальний рівень утрат активної потужності буде при мінімальному значенні модуля РП $|Q|$. Плюсове значення Q пов'язане з спрямуванням РП в електронавантаження, а мінусове Q – із протилежним. Утрати активної потужності від передавання РП не залежать від її знаку, а визначаються лише абсолютною величиною Q .

Для математичного описання умови мінімізації утрати активної потужності, потрібно обмежити „знизу” величину критерію ефективності. Зваживши на стимулювання енергокомпанією до споживання певної кількості РП, зокрема в режимі мінімальних навантажень енергосистеми, то для любого випадку можливо використати обмеження у вигляді:

$$Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}}, \quad (3.1)$$

$Q_{\text{доп}}$ – припустиме значення РП.

Умова (3.1) охоплює всі можливі случаї роботи. Під час роботи у режимі мінімальних навантажень, коли потрібно підтримати споживання РП не менше заданого рівня. Тоді приймають таке значення $Q_{\text{доп}}$, що рівне мінімальному можливому її значенню. Під час роботи у режимі максимальних навантажень, коли РП не повинна перевищувати заданої величини. Для цього случая та всіх інших можна задатися значенням $Q_{\text{доп}} = 0$. Необхідні величини РП будуть забезпечені лише тоді, коли для цього вистачає потужності БК та за умови виконання обмежуючої умови (3.1).

2. У п. 2.4.1 даної роботи проілюстровано, що рівні несиметричності напруги оберненої та нульової послідовностей можуть бути значними і допустимість їх значень можна досягти технічними обмеженнями виду:

$$\left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}};$$

$$\left| \dot{U}'_0 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_0 \right| \leq U_{0\text{доп}},$$

$\dot{U}'_2$, $\dot{U}'_0$ – вектори напруг відповідно оберненої і нульової послідовностей у точці підключення БК (до реалізації управляючого рішення);

$\Delta \dot{U}_2$, $\Delta \dot{U}_0$ – матриці додатків напруги відповідно оберненої та нульової послідовностей розмірністю $(m \times 1)$, встановлюються внаслідок включення відповідних секцій БК;

$U_{2\text{доп}}$, $U_{0\text{доп}}$ – допустимі рівні напруг відповідно оберненої та нульової послідовностей.

Значення $U_{2\text{доп}}$ і $U_{0\text{доп}}$ можна приймати за вимогами технології або роботи окремих електричних навантажень. Зокрема, $U_{2\text{доп}}$ для АД можливо визначати під час управління за методом, описаним в підрозділі 2.2.

3. Дивлячись вихідне значення напруги прямої послідовності може створитися необхідність забезпечення припустимого значення відхилення напруги у точках мережі при керуванні РП. Проведений аналіз показав, що особливість завдання контролю напруги в такому випадку полягає в необхідності підтримати допустимі відхилення лінійних та фазних напруг для можливості нормальної роботи однофазних приймачів. Зважаючи, що ріст напруги пропорційний її вихідному значенню, (для найвищої по модулю

напруги додаток буде найбільшим і навпаки), то обмеження має бути забезпечене фази з її найбільшим значенням:

$$\left| \dot{U}_s + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s) \right| \leq U_{\max \text{ доп}},$$

$\dot{U}_s$ – напруга на шинах ТП у тій з фаз, де спостерігається найбільший її рівень при відключеній БК;

s – індекс, відповідає фазі з найбільшою напругою;

$\Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s)$ – матриця додатків напруги по фазі s розмірністю $(m \times 1)$, що мають місце внаслідок включення відповідних секцій БК;

$U_{\max \text{ доп}}$ – напруга відповідна максимально допустимому її відхиленню.

4. Певне з обмежень матмоделі повинно вказувати, що для отримання ефекту в електромережі кожна із секцій БК може бути включеною або виключеною:

$$\mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n},$$

$\bar{\mathbf{X}}$ – фіктивний вектор розмірністю $(m \times 1)$, компоненти якого $\bar{x}_i$ мають такий зв'язок із змінною x_i вектора $\mathbf{X}$, що при $\bar{x}_i = 1$, то $x_i = 0$ і навпаки;

$\mathbf{n}$ – одинична матриця-стовпець розмірністю $(m \times 1)$.

Створене математичне забезпечення передбачає управління РП в режимі онлайн. При цьому через проміжки часу збирається необхідна оперативна інформація стосовно параметрів стану об'єкта управління, обчислюється та реалізовується вектор управління.

Для полегшення процесу обчислення вектора управління з метою мікропроцесорної реалізації керуючої системи, можна користуватися такою схемою прийняття рішень:

- отримується необхідна інформація стосовно параметрів електричного режиму;
- проводиться попереднє оцінювання того, які із впливових чинників актуальні зараз;
- виконується обрахунок вектора управління за відповідною матмоделлю, яка охоплює всю множину значущих чинників для моменту вироблення рішення.

Для цього в роботі запропоновано п'ять мат моделей. Ними можна користуватися при оптимальному управлінні реактивним навантаженням для випадку несиметричності напруг у точці підключення БК.

3.3 Матмоделі з урахуванням несиметричності напруг при керуванні БК

Якщо попередньо було оцінено співвідношення певних режимних параметрів і встановлено недоцільність контролю відхилення напруги, а рівень несиметричності може сягнути неприпустимих значень, то для розрахунку вектора управління при сполученні секцій БК за схемами трикутник та зірка можна скористатись відповідними матмоделями:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min; \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}}; \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n}; \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta \mathbf{Q}(U) \rightarrow \min; \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta \mathbf{Q}(U) \geq Q_{\text{доп}}; \\ |\dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2| \leq U_{2\text{доп}}; \\ |\dot{U}'_0 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_0| \leq U_{0\text{доп}}; \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n}; \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (3.3)$$

Матмоделі (3.2) – (3.3) дискретні, це викликано конструктивними особливостями БК.

Функція цілі матмоделей описує величину РП в живлячій лінії. По першому обмеженню контролюється величина РП, що буде генеруватися внаслідок реалізації вектора управління. По другому обмеженню контролюється нижній рівень напруги оберненої послідовності. По третьому обмеженню матмоделі (3.3) контролюється нижній рівень напруги нульової послідовності. Останнє обмеження показує, що для того щоб був ефект в мережі кожна із секцій БК може бути включеною або виключеною.

3.4 Матмоделі з урахуванням рівня відхилень напруг за фазами при керуванні БК

Внаслідок росту напруги із-за включення секцій БК її відхилення може перевищити припустиме значення. Якщо цей чинник актуалізується для певного моменту часу здійснення управляючого рішення, то система розрахунку вектора управління повинна використати відповідну матмодель.

Створені матмоделі, які дозволяють відшукати оптимальний вектор управління РП при сполученні секцій БК за схемами трикутник та зірка в умовах несиметричності напруг електромережі та з урахуванням значення відхилення напруги, виглядають так:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min; \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}_s + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s) \right| \leq U_{\text{max.доп}}; \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n}; \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min; \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}'_0 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_0 \right| \leq U_{0\text{доп}}; \\ \left| \dot{U}_s + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s) \right| \leq U_{\text{max.доп}}; \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n}; \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Матмоделі (3.4) – (3.5) порівняно з матмоделями (3.2) – (3.3) отримують додаткові властивості внаслідок технічного обмеження, згідно якого здійснюється контроль в одній із фаз величини відхилення напруги.

Введення в матмоделі (3.2) – (3.3) іще одного обмеження у вигляді не скалярної функції дійсної змінної підвищує трудоемність розрахунків.

Однак може відбутися упрощення матмоделей (3.2) – (3.5) у випадку якщо обмеження на РП в живлячій лінії може в момент вироблення управляючого рішення не актуальним. Такого висновку можливо дійти за попередніми оцінками станових параметрів системи. Для прикладу, споживана РП перевищує потужність БК. Тоді зворотних перетоків РП в електромережі

енергопостачальної організації внаслідок виконання управляючого рішення не може бути. Тоді можна вилучити відповідне обмеження з матмоделі.

Для рішення задач описаних матмоделями (3.2) – (3.5) жоден із класичних методів не підходить, внаслідок того що матмоделі включають обмеження описувані не скалярною функцією дійсної змінної (а саме обмеження на рівень напруги оберненої та нульової послідовності), а коефіцієнти функції цілі міняються залежно від прийнятого на попередній ітерації рішення. Описані методи аналізу матмоделей не скалярної оптимізації [44, 45] відносяться до матмоделей, в яких функція цілі представлена в не скалярному вигляді. Тому вимагається деяке пристосування до задач (3.2) – (3.5). Виникає необхідність створення методу обчислення для визначення оптимального вектора управління БК із урахуванням рівня несиметричності напруг. В якості основи варто взяти метод динамічного програмування, що найефективніший за трудоемністю розрахунків для рішення подібних задач.

3.5 Розробка алгоритму аналізу створених матмоделей

Створений чисельний метод для рішення задачі, ґрунтується на ідеї методу динамічного програмування. Обрання методу динамічного програмування обумовлене багатоетапністю задачі. По суті на кожному етапі вирішується яку чергову секцію БК потрібно увімкнути. Метод має порівняно просту процедуру обчислення, що є важливо у випадку мікропроцесорного втілення оптимального управління. Записані у вигляді нерівностей технічні обмеження дають можливість сформулювати на кожному з етапів k множину дозволених до включення секцій БК – D^k , які одночасно задовольняють усі умови. Любий елемент згаданої множини $Q^k \in D^k$, $1 \leq k \leq R^k$ – РП секції БК із кількості тих, що лишилися не увімкненими на попередніх $(k-1)$ етапах рішення задачі, R^k – общее число елементів множини D^k .

Рішення задачі КРН з застосуванням методу динамічного програмування та з урахуванням рівня несиметричності напруг згідно до матмоделей (3.2) – (3.5) можна виконувати за таким.

Крок *A*. Всі складові вектора **X** прирівнюються нулеві.

Крок *B*. Визначаються матриці потужностей, що відповідають дійсним напругам в електромережі, для секцій БК сполучених по схемі трикутника:

$$\Delta Q^k(U^k) = \frac{1}{3} \cdot \Delta Q_H \cdot \frac{(U_{AB}^k)^2 + (U_{BC}^k)^2 + (U_{CA}^k)^2}{U_{\text{нмф}}^2}$$

або зірки:

$$\Delta Q^k(U^k) = \frac{1}{3} \cdot \Delta Q_H \cdot \frac{(U_A^k)^2 + (U_B^k)^2 + (U_C^k)^2}{U_{\text{ном.л}}^2},$$

$U_{AB}^k, U_{BC}^k, U_{CA}^k$ – лінійні напруги на *k*-му етапі;

U_A^k, U_B^k, U_C^k – фазні напруги на *k*-му етапі;

$U_{\text{ном.л}}$ – номінальна лінійна напруга.

Здійснюється перебір секцій БК, по яким не вироблене рішення, і встановлюються ті, при яких виконуються обмеження матмоделей (3.2) – (3.5):

$$D^k : Q^k \leq Q' - X^T \cdot \Delta Q^k(U^k) - Q_{\text{доп}}.$$

Величини потужностей встановлених секцій формують множину D^k .

У разі коли множина D^k пуста, то це означає що оптимальне вирішення було досягнуто на попередньому етапі (*k*-1). Вектор управління приймається до

реалізації (якщо $k = 1$, то всі складові вектора управління $\mathbf{X}$ нульові ($x_i = 0$); якщо $k > 1$, то в якості остаточного залишається рішення прийняте на попередньому етапі).

Крок *С*. Виконується перебір всіх потужностей секцій БК із множини D^k і, по рекурентним виразам:

$$\begin{cases} f^1 = \min_{1 \leq r \leq R^1} \{Q - \Delta Q_r^I(U)\}; \\ \dots \\ f^k = \min_{1 \leq r \leq R^k} \{f^{k-1} - \Delta Q_r^k(U)\}, k = II, III, \dots, n, \end{cases}$$

встановлюється та, що забезпечує максимальний від'ємний прирост функції цілі, де f^k – оцінка стану системи на етапі k – РП на вводі, за умови втілення всіх рішень, що прийняті на попередніх етапах з даним включно;

$\Delta Q_r^k(U)$ – елемент множини D^k .

Приведені рекурентні вирази за умов коли потрібно забезпечити генерацію РП в живильну мережу використовувати не можна.

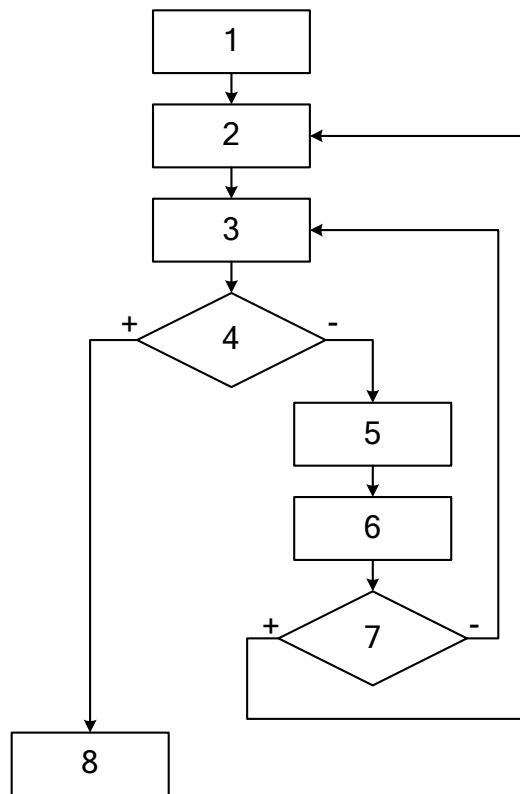
Крок *Д*. Здійснюється обрахунок для уточнення потужності, яка відбирається до включення секції БК, маючи на увазі, що включені всі секції по яким вироблене рішення на k етапах.

Перевіряється виконання умов описаних обмеженнями матмоделі.

Коли любе із обмежень раптом не виконується, то величина потужності даної секції видаляється із масиву D^k і подальшого розгляду взагалі, а обчислення виконуються з кроку *С*.

Крок *Е*. Відповідній складовій вектора управління присвоюється значення одиниці, $k=k+I$, та відбувається перехід до кроку *В*.

Описаний алгоритм зображений на рис. 3.2. у вигляді блок-схеми.



1 – складові вектора $\mathbf{X}$ обнуляються; 2 – обрахунок потужностей секцій БК, що відповідають реальним напругам в електромережі; 3 – відшукування попередньої множини допустимих до включення потужностей секцій БК – D^k на етапі k ; 4 – встановлення чи множина D^k пуста; 5 – обрання із множини D^k секції БК, що забезпечує максимальний від’ємний приріст функції цілі; 6 – уточнений обрахунок потужності, відібраної до включення секції БК і тих секцій БК, рішення по яким прийнято раніше; 7 – верифікація виконання умов, описаних обмеженнями матмоделей; 8 – вектор управління знайдено

Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму визначення вектора управління в умовах несиметричності напруг

3.6 Матмодель, яка враховує несиметричність напруг при управлінні секціями БК, що перемикаються зі схеми трикутник в зірку

Існують схеми секцій БК, що здійснюють переключення із трикутника в зірку, наприклад як на рис. 3.4.

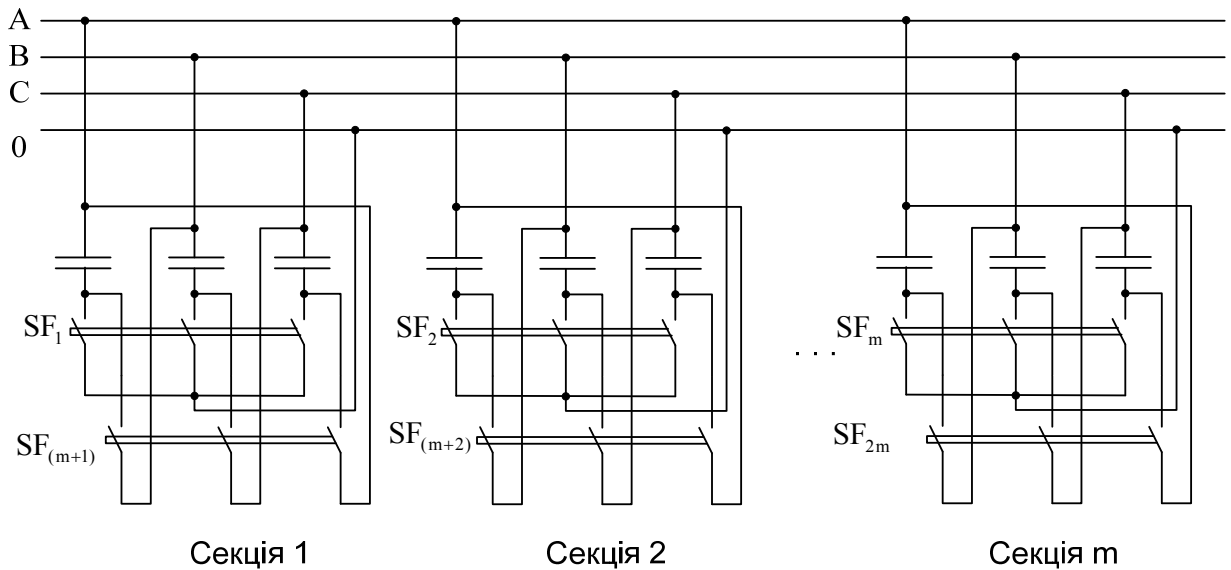


Рис. 3.4 Система перемикачів секцій БК із трикутник в зірку

Так переключення першої секції БК, рис. 3.4, здійснюється за допомогою комутуючих апаратів SF_1 і $SF_{(m+1)}$ (SF_1 включає секції по схемі зірка, $SF_{(m+1)}$ – по схемі трикутника).

Можливість переключення i -ої секції БК із трикутника на зірку дозволяє маючи величину потужності $Q_{ном}$ (відповідає номінальній лінійній напрузі) отримувати наступні варіанти генерації РП:

$Q_{ном}$ (включений $SF_{(m+i)}$, виключений SF_i);

$Q_{ном} / 3$ (включений SF_i , виключений $SF_{(m+i)}$);

0 (виключені SF_i та $SF_{(m+i)}$).

Така схема виконання секцій БК підвищує число варіантів можливих включень. Виникає змога із дискретного ряду потужностей точніше обирати комбінацію включень та збільшити ефективність застосування БК і системи управління в цілому.

Упливи на параметри електричного режиму в мережі реалізовані за допомогою БК підключені за певною схемою за умов несиметричності напруг, були досліджені в п.п. 2.1.

Секції БК, які включені в трикутник впливають на режим оберненої послідовності, включені в зірку, – одночасно на режими оберненої і нульової послідовностей. Разом з тим чиниться вплив на величину відхилення напруги, контролювання якого слід виконувати по величині напруги однієї з фаз. Тому матмодель має включати відповідні технічні обмеження.

Для кожної секції БК може бути такі комбінації станів комутаторів:

- 1) SF_i – включено; $SF_{(m+i)}$ – виключено;
- 2) SF_i – виключено; $SF_{(m+i)}$ – включено;
- 3) SF_i ; $SF_{(m+i)}$ – виключено, що має знайти відображення в матмоделі управління.

Приймемо вектор управління у вигляді $\mathbf{X}^T = (\mathbf{X}_1^T \quad \mathbf{X}_2^T)$. Тут $\mathbf{X}_1^T$ вектор управління розмірністю $(m \times 1)$, кожна складова його описує стан комутатора, який сполучає відповідну секцію в зірку. Так коли $x_i = 1$, то це втілюється включенням комутатора SF_i , і навпаки; $\mathbf{X}_2^T$ стан комутатора, що сполучає відповідну секцію в трикутник. Так коли $x_{(m+i)} = 1$, то це втілюється включенням комутатора $SF_{(m+i)}$, і навпаки.

Можливі комбінації станів комутаторів записуються у вигляді:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 + \bar{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{n}; \\ \mathbf{X}_2 + \bar{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{n}; \\ x_i + x_{(m+i)} \in \{1, 0\}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \end{cases}$$

$\bar{\mathbf{X}}_1$; $\bar{\mathbf{X}}_2$ – фіктивні вектори управління, розмірністю $(m \times 1)$, кожна складова яких $\bar{x}_i$ та $\bar{x}_{(m+i)}$ зв'язана із змінними x_i та $x_{(m+i)}$ векторів $\mathbf{X}_1$ і $\mathbf{X}_2$ таким чином, що коли $\bar{x}_i = 1$, $\bar{x}_{(m+i)} = 1$, то $x_i = 0$, $x_{(m+i)} = 0$ і навпаки.

Для схеми рис. 3.4, запропонована матмодель, яка уможлиблює знаходження оптимального вектора управління РП в умовах несиметричності напруг мережі:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \mathbf{X}_1^T \cdot \Delta \mathbf{Q}_\Delta(U) - \mathbf{X}_2^T \cdot \Delta \mathbf{Q}_Y(U) \rightarrow \min; \\ Q' - \mathbf{X}_1^T \cdot \Delta \mathbf{Q}_\Delta(U) - \mathbf{X}_2^T \cdot \Delta \mathbf{Q}_Y(U) \geq Q_{\text{доп}}; \\ |\dot{U}'_2 + \mathbf{X}_1^T \cdot \Delta \dot{U}_{2\Delta} + \mathbf{X}_2^T \cdot \Delta \dot{U}_{2Y}| \leq U_{2\text{доп}}; \\ |\dot{U}'_0 + \mathbf{X}_2^T \cdot \Delta \dot{U}_{0Y}| \leq U_{0\text{доп}}; \\ |\dot{U}_s + \mathbf{X}_1^T \cdot \Delta \dot{U}_{s\Delta}(\dot{U}_s) + \mathbf{X}_2^T \cdot \Delta \dot{U}_{sY}(\dot{U}_s)| \leq U_{\text{мах.доп}}; \\ \mathbf{X}_1 + \bar{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{n}; \\ \mathbf{X}_2 + \bar{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{n}; \\ x_i + x_{(m+i)} \in \{1, 0\}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ x_i, \bar{x}_i, x_{(m+i)}, \bar{x}_{(m+i)} \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Δ відповідає лінійній напрузі, а Y – фазній напрузі.

$\Delta \dot{U}_{2Y}$ і $\Delta \dot{U}_{0Y}$ розраховуються відповідно за виразами (2.5) та (2.6).

Необхідні параметри по секціях БК для схеми сполучення трикутник:

$$\Delta \dot{U}_{2\Delta} = 3 \cdot \Delta \dot{U}_{2Y};$$

$$\Delta \mathbf{Q}_\Delta(U) = 3 \cdot \Delta \mathbf{Q}_Y(U).$$

Можливим підходом до прийняття управляючого рішення для БК такої конструкції полягає в поділі на дві послідовно вирішувані підзадачі. Перша полягає в прийнятті рішення по секціях БК, які включаються в трикутник, відповідно до виразів (3.2) або (3.4) по алгоритму рис. 3.2. По секціях БК, які

лишилися, приймається рішення другого етапу з огляду на включення їх у зірку та за умови втілення рішення першого етапу відповідно до виразів (3.3) або (3.5) по алгоритму рис. 3.2. За такого підходу шкідливий вплив на параметри несиметричності режиму мінімізуватиметься. В першу чергу максимально примінюються секції БК, які мають вплив лише на режим оберненої послідовності.

3.7 Матмодель симетрування напруг для БК із симетруючими секціями

У випадку застосування БК вказаної конструкції існує змога здійснювати симетрування напруги за підсумками втілення рішення з КРН. Приведемо математичну модель симетрування напруг при включенні всіх секцій БК на лінійну напругу, що впливає лиш на напругу оберненої послідовності.

В такому випадку процес управління зводиться до послідовного рішення двох підзадач. Перша підзадача КРН, наприклад, за матмоделлю (3.2). Отриманий розв'язок втілюється. Вимірюються потрібні режимні параметри нового стану системи. Це робить можливим збільшити точність управління внаслідок виключення розрахункових похибок, пов'язаних із прийнятими припущеннями. Визначається вектор управління по секціям симетрування БК. Для цього можна використати однією із відомих матмоделей та відповідним методом для виконання її аналізу [55].

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \dot{U}''_2 + \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{A} + j \cdot \left(\operatorname{Im} \dot{U}''_2 + \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{B} \right) \right| \rightarrow \min; \\ Q'' - \mathbf{Y}^T \cdot \Delta Q(\mathbf{U}) \geq Q_{\text{доп}}; \\ \mathbf{Y} + \bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{n}; \\ y_i, \bar{y}_i \in \{1, 0\}, \quad i = 1, 2, \dots, \vartheta, \end{cases} \quad (3.7)$$

Q'' – РП навантаження, що підключене до шин ТП, за умови втілення рішення з КРН;

$\dot{U}''_2$ – напруга оберненої послідовності за результатами втілення рішення з КРН;

$\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ – матриці-стовпці розмірністю (9×1) дійсних та уявних частин напруг оберненої послідовності, що встановлюються при включенні відповідної несиметричної секції БК;

$\mathbf{Y}$ – вектор управління по секціях БК несиметричного виконання розмірністю (9×1) ;

$\bar{\mathbf{Y}}$ – вектор фіктивних змінних, кожна складова якого пов'язана із відповідною змінною вектора $\mathbf{Y}$ так що при $\bar{y}_i = 1$, $y_i = 0$ і навпаки.

Приведена матмодель забезпечує мінімум напруги оберненої послідовності шляхом включення секцій БК несиметричного виконання. Перше обмеження здійснює контроль величини РП в живлячій лінії, що буде мати місце в результаті управління. Друге обмеження матмоделі ілюструє, що люба секція БК може бути включеною або виключеною.

Після утвердження рішення по симетруванню напруг алгоритмом розрахунку можливо передбачити уточнення рішення по секціях БК, що мають однакові міжфазні ємкості.

3.8 Тестування методу обчислення з аналізом результатів

Для оцінювання ефективності виконаних розробок здійснимо тестування запропонованого метода обчислення в процесі обрахунку векторів управління за матмоделями (3.2) – (3.5) та (3.6).

Визначемо вектори управління за матмоделями (3.2) – (3.5) коли у точці навантаження чотирипровідної електромережі споживача, рис. 3.5, встановлено БК із керованими секціями. Потужності секцій БК з однаковими міжфазними (фазними) ємкостями, які відповідають номінальній напрузі складають: 450

квар; 300 квар; 225 квар; 150 квар; 105 квар; 60 квар; 30 квар. Комплекси фазних напруг в точці підключення БК: $\dot{U}_A = 227,26e^{-j1,48^\circ}$ В; $\dot{U}_B = 219,28e^{-j118,83^\circ}$ В; $\dot{U}_C = 223,59e^{j120,35^\circ}$ В. Початковий режим відповідає вимкненим секціям БК.

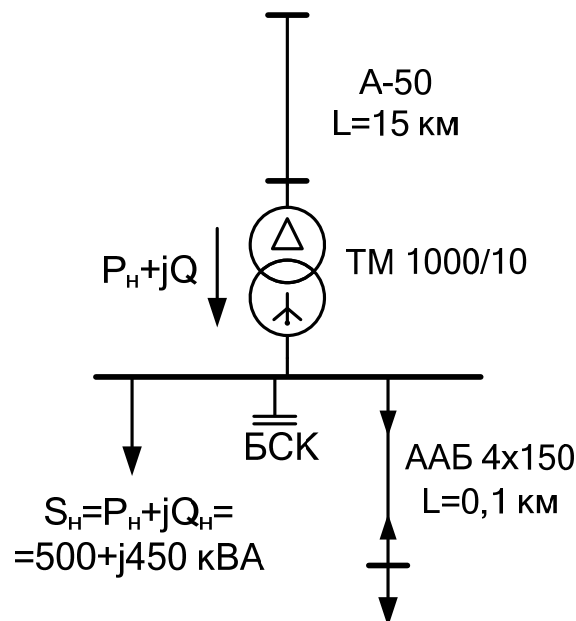


Рис. 3.5 – Розрахункова схема та початкові дані до умови задачі

Умови, що мають бути забезпечені:

- 1) припустиме значення РП $Q_{\text{доп}} = 0$ квар;
- 2) фазна напруга на шинах має бути не вище $U_{\text{max, доп}} = 231$ В;
- 3) U_2 , спричинена несиметричними навантаженнями, підключеними до кабелю 0,4 кВ, $U_{2\text{доп}} = 4,4$ В;
- 4) U_0 , спричинена несиметричними навантаженнями, підключеним до кабелю 0,4 кВ, $U_{0\text{доп}} = 4,4$ В.

Обрахувати вектор управління, вважаючи, що:

а) БК сполучена в трикутник

– нехтуючи впливом на несиметричність і відхилення напруги;

- за матмоделлю (3.2);
- за матмоделлю (3.4);
- б) БК сполучена у зірку
 - нехтуючи впливом на несиметричність і відхилення напруги;
 - за матмоделлю (3.3);
 - за матмоделлю (3.5).

Процес рішення задачі по окремих етапах за матмоделлями (3.2) – (3.5) приведений у табл. 3.3 – 3.5. Для зрівнювання в табл. 3.1 – 3.2 зведені результати рішення тієї ж задачі управління за відсутності обмежень по контролю рівня несиметричності напруг в матмоделях (3.2) – (3.3).

В таблицях з результатами обрахунків, Q – РП в живильній лінії за результатами реалізації вектора управління.

Таблиця 3.1. Результати обрахування вектора управління для БК сполученої у трикутник без урахування несиметричності напруг

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих.стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,31	3,29	227,25	3,31
1	(1 0 0 0 0 0 0)	9,38	4,42	3,29	232,42	5,66

Таблиця 3.2. Результати обрахування вектора управління для БК сполученої в зірку без урахування несиметричності напруг

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих.стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,32	3,27	227,25	3,31
1	(1 0 0 0 0 0 0)	-35,61	4,42	3,36	232,52	5,71

Таблиця 3.3 – Результати обрахування вектора управління по матмоделі (3.2)

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих.стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,32	3,27	227,25	3,31
1	(0 1 0 0 0 0 0)	160,68	4,37	3,27	230,68	4,87
2	(0 1 0 0 1 0 0)	55,24	4,41	3,29	231,91	5,42

Таблиця 3.4 – Результати обрахування вектора управління по матмоделі (3.4)

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих.стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,32	3,27	227,25	3,31
1	(0 1 0 0 0 0 0)	160,68	4,39	3,29	230,68	4,87

Таблиця 3.5 – Результати обрахування вектора управління по матмоделі (3.3)

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих. стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,32	3,27	227,25	3,31
1	(0 1 0 0 0 0 0)	131,12	4,39	3,34	230,75	4,88
2	(0 1 0 0 1 0 0)	14,93	4,41	3,35	232	5,46

Таблиця 3.6 – Результати обрахування вектора управління по матмоделі (3.5)

№ етапу	Вектор управління $\mathbf{X}^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих. стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	4,32	3,29	227,25	3,31
1	(0 1 0 0 0 0 0)	131,12	4,39	3,34	230,75	4,88

Виконуючи порівняння результатів обрахунків за матмоделями (3.2) – (3.5), що ураховують несиметричність напруг, та за матмоделями, які не враховують її, робимо висновок, що отримані остаточні вектори управління відрізняються.

Результати получені за матмоделлю (3.2) забезпечують допустимі значення U_2 , а за матмоделлю (3.3) – U_2 , U_0 та залишкову РП (інші обмежувальні умови не ставились). Матмоделі (3.4) та (3.5) надають додатково

обмеження значення напруги U_A . Результатом рішення тієї ж задачі але без урахування несиметричності режиму є інший вектор управління, втілюючи який з'являється зворотний потік РП (з мережі споживача в мережу енергопостачальної організації) навіть за умов відповідного обмеження в матмоделі, а також U_2 та U_A будуть вищі за допустимі значення.

Результати обрахунків підтверджують висновки, отримані теоретично, про необхідність урахування несиметричності напруг при керуванні РП і що до працездатності запропонованого числового методу.

Обрахуємо вектор управління за матмоделлю (3.6), коли у точці навантаження чотирипровідної електромережі споживача, рис. 3.5, встановлено БК із керованими секціями, що можуть підключатися як на міжфазні, так і на фазні напруги. Потужності секцій БК, що відповідають номінальній міжфазній напрузі, 180 квар, 150 квар, 120 квар, 90 квар. При цьому має бути забезпечено виконання тих самих умов як і при розрахунку за матмоделлями (3.2) – (3.5).

Визначимо вектори управління БК для випадків, коли Q' рівна 380, 250 і 80 квар. Хід рішення задачі по окремих етапах за матмоделлю (3.6) зведений в табл. 3.7 – 3.9. З метою порівнювання в табл. Б.1 – Б.4 наведені результати рішення тієї самої задачі управління за відсутності обмежень по рівню несиметричності та відхиленню напруги.

Таблиця 3.7. Визначення вектора управління на етапах рішення задачі за матмоделлю (3.6) ($Q' = 380$ квар)

№ етапу	Вектор X_1^T	Вектор X_2^T	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих. стан	(0 0 0 0)	(0 0 0 0)	380	3,9	3,5	227,08	3,21
1	(1 0 0 0)	(0 0 0 0)	209,01	3,95	3,5	229,18	4,18
2	(1 1 0 0)	(0 0 0 0)	61,76	3,96	3,5	230,93	4,97

Таблиця 3.8. Результати обрахунку вектора управління на етапах рішення задачі за матмоделлю (3.6) ($Q' = 250$ квар)

№ етапу	Вектор $\mathbf{X}_1^T$	Вектор $\mathbf{X}_2^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих. стан	(0 0 0 0)	(0 0 0 0)	250	3,5	3,8	224,18	1,9
1	(1 0 0 0)	(0 0 0 0)	83,61	3,54	3,8	226,1	2,81
2	(1 0 0 0)	(0 1 0 0)	32,38	3,57	3,84	227,92	3,61
3	(1 0 0 0)	(0 1 0 1)	1,41	3,57	3,83	228,98	4,09

Таблиця 3.9. Результати обрахунку вектора управління на етапах рішення задачі за матмоделлю (3.6) ($Q' = 80$ квар)

№ етапу	Вектор $\mathbf{X}_1^T$	Вектор $\mathbf{X}_2^T$	Q , квар	U_2 , В	U_0 , В	U_A , В	δ_{UyA} , %
Вих. стан	(0 0 0 0)	(0 0 0 0)	80	3,5	4,36	229,62	4,37
1	(0 0 0 0)	(0 0 0 1)	45,52	3,51	4,38	230,67	4,86

Як видно із результатів обчислень, необхідність перемикання БК із трикутника в зірку виправдана, адже дозволяє окрім вигідного використання наявних секцій БК запобігти додатковим витратам на їх купівлю.

Виконаємо порівняння получених результатів і зробимо висновки:

1. Для випадків, коли Q' дорівнює 380 квар і 80 квар, табл. 3.7, 3.9 вектор управління змінюється внаслідок ускладнення матмоделі додатковими обмеженнями, що контролюють рівень несиметричності та відхилення напруги. В результаті РП в живлячій лінії зростає порівняно з результатом, отриманим без урахування несиметричності напруг. Така обставина не закономірна.

Величина несиметричності та відхилення напруги лежать в допустимих межах за умовою прикладу.

2. Для випадків, коли $Q' = 250$ квар, урахування дійсного значення напруги дозволяє точніше оцінити потужність генерації секцій БК та забезпечити мінімальне значення РП в живлячій лінії. Обрахунок вектора управління, зупиняється на другому етапі поскільки відсутня секція потрібної потужності. Номінальна потужність включених секцій становить 230 квар. РП, яка відповідає реальним напругам в точці підключення БК, рівна 217,62 квар, тобто реальна РП в лінії живлення становить 32,38 квар замість 20 квар, що дає можливість знизити останню до 1,43 квар за рахунок включення секції з потужністю 90 квар, підключивши її по схемі зірка, табл. 3.8.

3.9 Висновки за третім розділом

1. Оптимальне управління реактивним навантаженням може виконуватись шляхом рішення послідовності задач математичного програмування для випадку дискретних моментів часу з подальшим втіленням визначених векторів управління. Обрахунок вектора управління можна виконувати за матмоделлю, яка враховує актуальні на момент аналізу чинники.

2. Багатокритеріальна задача КРН, розв'язком якої є вектор управління для певного дискретного моменту часу, можна розв'язати методом суперпозиції по критерію мінімуму РП в живильній лінії.

3. Розроблені матмоделі, які дозволяють визначити вектор управління реактивним навантаженням за допомогою БК у випадках, якщо секції останніх скомутовані у вигляді схеми трикутника, зірки або схеми що допускає переключення із однієї схеми на іншу. Матмоделі можуть бути застосовані, якщо виникає необхідність в забезпеченні нормованих величин значень коефіцієнтів несиметричності напруг та її відхилення в одній із трьох фаз.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ НА КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ

Практичне підтвердження правильності отриманих теоретичних результатів, доречності їх використання та визначення умов, при яких спостерігатиметься позитивний ефект, можна отримати за рахунок дослідження оптимального управління реактивним навантаженням на комп'ютерній моделі. При такому комп'ютерному моделюванні система управління:

- об'єкт управління – електромережа (з усією повнотою потрібних режимних параметрів);
- пристрій прийняття рішення – система обчислення що реалізує створений алгоритмом;
- пристрій управління – дискретна БК (з її характеристиками) може бути промодельована в Matlab Simulink.

Реальні результати оптимального управління, які необхідні для аналізування, можна отримати провівши вимірювань потрібних режимних параметрів в модельованій електромережі.

В четвертому розділі роботи промодельована система оптимального управління РП за допомогою БК, які працюють в умовах несиметричності напруг, що реалізує розроблені в дисертації матмоделі та обчислювальні методи.

Для отримання траєкторій управляємих станових параметрів електромережі, як вихідні дані, застосовані матеріали експериментальних досліджень, здійснених за допомогою атестованого пристрою РЕГІНА в мережах ПрАТ «Кіровоградобленерго».

4.1 Модель системи управління РП в електромережі

Розробимо структурну схему і програмне забезпечення пристрою прийняття управляючого діяння. Для цього використаємо можливість блокового моделювання пакету Matlab. В основі роботи такого пристрою буде покладено алгоритм обчислення вектора управління в умовах несиметричності напруг, рис. 3.3.

На рис. 4.1 зображена модель системи прийняття управляючого діяння з компенсації РП, реалізована в пакеті Simulink, яка складається з:

- підсистема початкових даних;
- Subsyst1 виконує обчислення початкових умов;
- Subsyst2 підсистема прийняття управляючого діяння ().

Початкові дані СПР – це дані про вимірювання модулів та кутів фазних напруг (mU_A , $\arg U_A$, mU_B , $\arg U_B$, mU_C , $\arg U_C$), РП навантаження (Q_{vx}), опори для струмів прямої, оберненої послідовностей (z_1 , z_2). Також потрібно знати припустимі значення РП (Q_{dop}), фазної напруги (U_{fdop}), коефіцієнта несиметричності напруг по оберненій послідовності (k_{2Udop}), паспортні дані використовуваного обладнання (потужності секцій БК відповідні номінальній напрузі (Q_n)).

Програма дає можливість слідкувати та виконувати порівняння порівнювати величин фазних напруг (U_A , U_B , U_C), РП в лінії (Q_{lin}), коефіцієнтів несиметричності напруг по оберненій послідовності (k_{2U}) до та після управління, стан кожної із секцій БК (X).

У підсистемі обчислення початкових умов фазні напруги розкладаються на складові по методу симетричних складових з наступним обчисленням k_{2U} , розрахунок потужності секцій БК, які відповідають дійсним напругам мережі. В

цьому місці і далі під k_{2U} буде розумітися відношення напруги оберненої послідовності до номінальної напруги.)

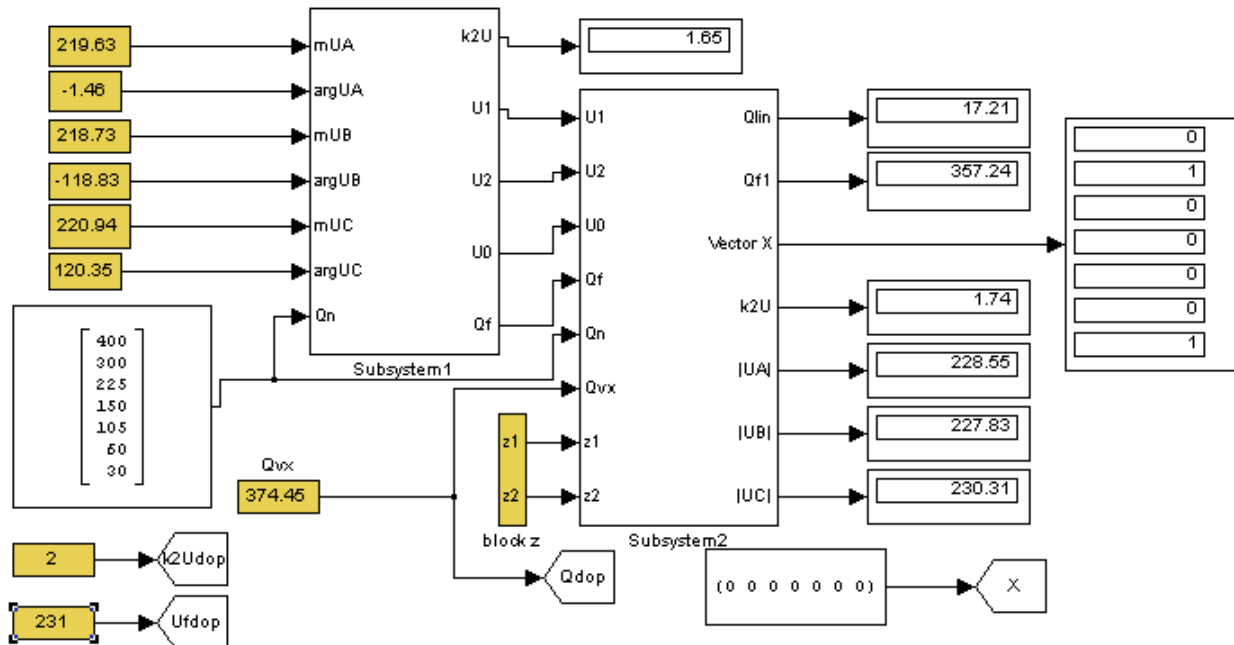


Рис. 4.1 Модель системи прийняття управляючого діяння з компенсації РП в пакеті Simulink

Структура підсистеми прийняття управляючого діяння повинна розроблятися у відповідності до характеристик встановленого КП. Для можливості всебічного аналізу включаючи доцільність параметрів пристрою управління для динамічних умов режиму в СЕП структура реалізує параметри БК та електромережі, що використані в п.п 3.8 роботи.

Розглянемо детальніше структуру підсистеми прийняття управляючого діяння, рис. 4.2:

- Subsys21 – підсистема вибору оптимальної до включення секції на k -му кроку;
- Subsys22 – підсистема присвоєння «1» відповідній складовій вектора X та видалення цієї ж секції із множини можливих до включення;

- Subsyst23 – підсистема обрахування додатків напруги прямої, оберненої послідовностей відповідних вхідному стану системи;
- Subsyst24 – підсистема трансформації, в якому транспонуються матриці потужності секцій та додатків напруги прямої, оберненої послідовностей по числу відповідному числу секцій;
- Subsyst25 – підсистема знаходження сумарного значення потужності секцій та додатків напруги прямої, оберненої послідовностей як результат реалізації вектора $\mathbf{X}$ на k -му кроці та всіх попередніх;
- Subsyst26 – підсистема обчислення фазних напруг та напруги оберненої послідовності;
- Subsyst27 – підсистема обчислення післядії, виконує повтор роботи Subsyst23-26);
- Subsyst28 – підсистема перевірки виконання умов матмоделі;
- Subsyst29 – підсистема обнулення відповідної складової вектора $\mathbf{X}$, що була вибрана до включення на k -му кроці у випадку невиконання умов матмоделі;
- Subsyst210 – підсистема зберігає і передає на $(k+1)$ кроці вектор $\mathbf{X}$ та множину допустимих до включення секцій БК.

Створена система працює так:

Значення mU_A , $\arg U_A$, mU_B , $\arg U_B$, mU_C , $\arg U_C$ разом із значеннями Q_n надходять в підсистеми Subsyst1. Там здійснюється обчислення симетричних складових напруг $(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0)$, k_{2U} та дійсне значення потужності секцій БК (Q_f).

Получені значення $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$, Q_f разом із Q_n , z_1 , z_2 , Q_{vx} надходять в підсистеми прийняття рішення Subsyst2.

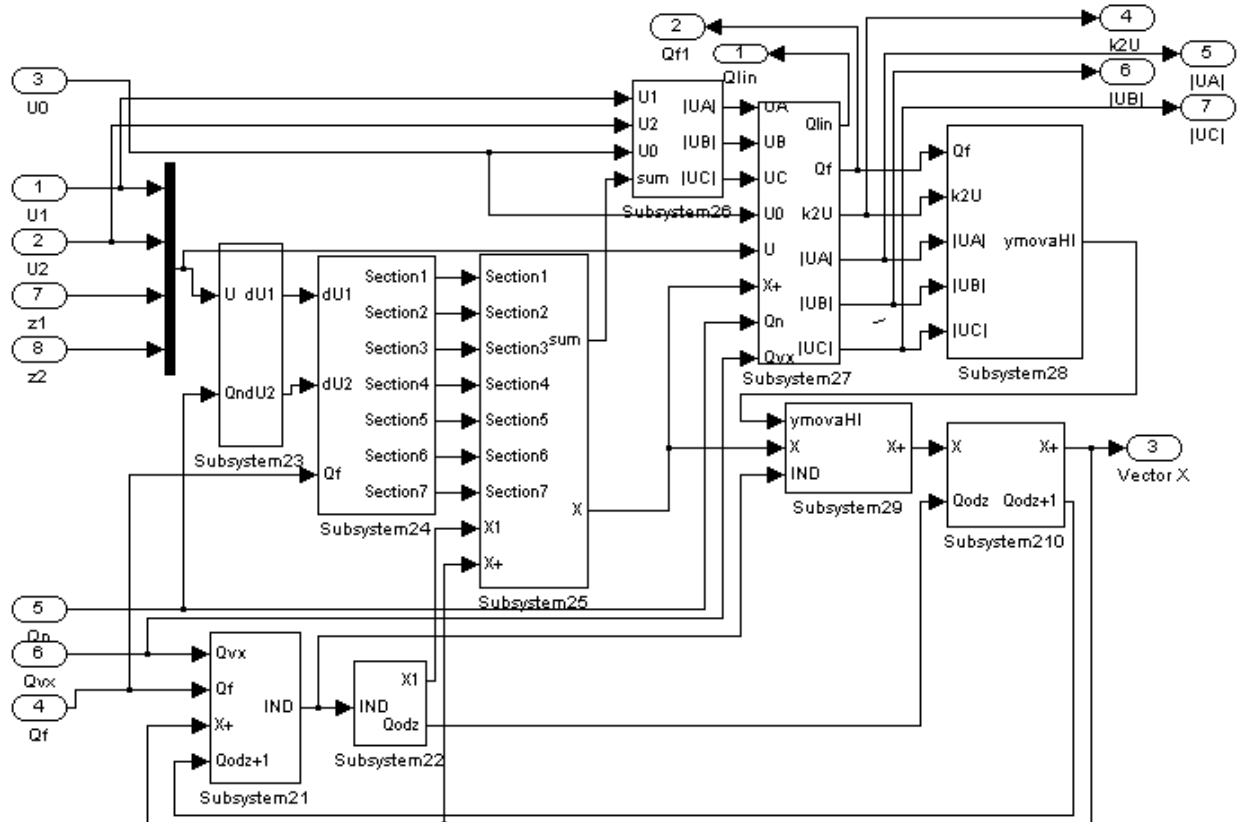


Рис. 4.2 Підсистема прийняття управляючого діяння в пакеті Simulink

На вхід підсистеми Subsys21, рис. 4.3, надходять Q_{vx} , Q_f , вектор управління $X +$ і фіктивний вектор Q_{odz+1} , складові якого обмежують область допустимих до включення секцій, отриманих на попередньому $(k-1)$ кроці – перший та другий виходи підсистеми Subsys210 відповідно. Тут за рекурентними співвідношеннями Р.Белмана обираються секції БК, включення якої забезпечить максимальний від’ємний ріст РП на вводі підприємства, уникаючи при цьому зворотних перетоків в мережі енергокомпанії. Із Subsys21 вихідний сигнал надходить в Subsys22 і це буде номер секції (IND), підбраної для включення, та фіктивний вектор потужностей Q .

В підсистемі Subsys22, рис. 4.4, присвоюється «1» елементу $X +$ під номером IND із одночасним присвоєнням значення нуль елементу під номером indmem (елемент, якому на передуючому кроці присвоєно «1»), а також видалення обраної секції із множини допустимих до включення, за рахунок корегування Q_{odz} , який передається на елемент пам'яті підсистеми Subsys210.

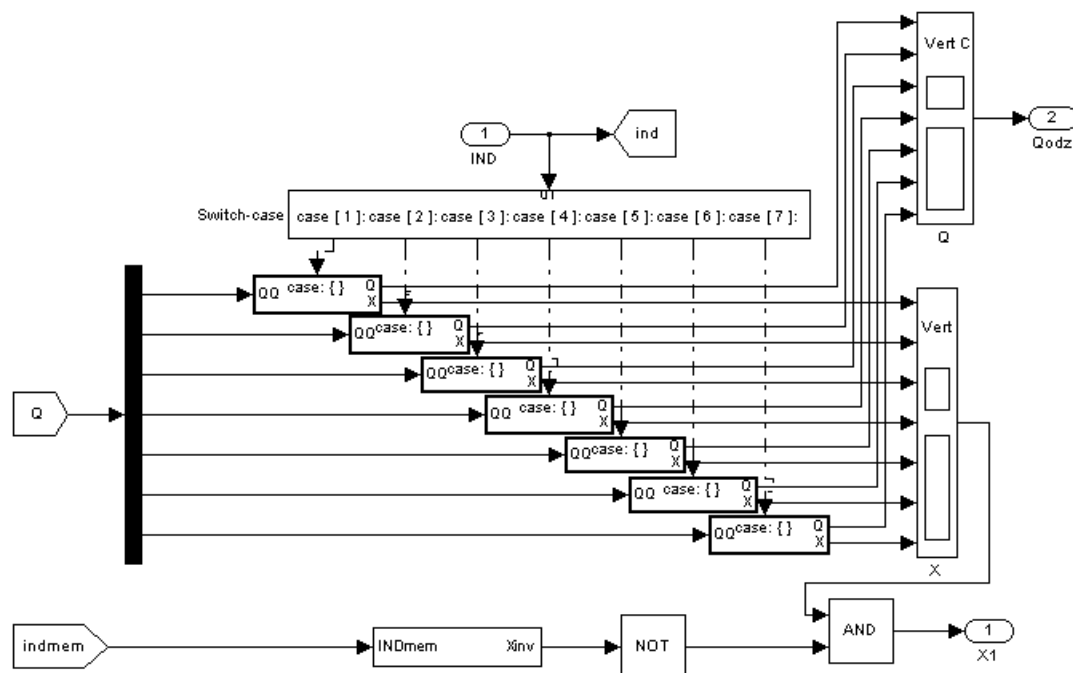


Рис. 4.4 Підсистема Subst22 в пакеті Simulink

За поданими на вхід підсистеми Subsys23, рис. 4.5, $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, z_1 , z_2 , Q_n обчислюються додатки напруг по послідовностях $\Delta\dot{U}_1$, $\Delta\dot{U}_2$, що разом із Q_f в підсистемі Subsys24 в формуються в 7 масивів даних Sect1–7, які характеризують кожну секцію.

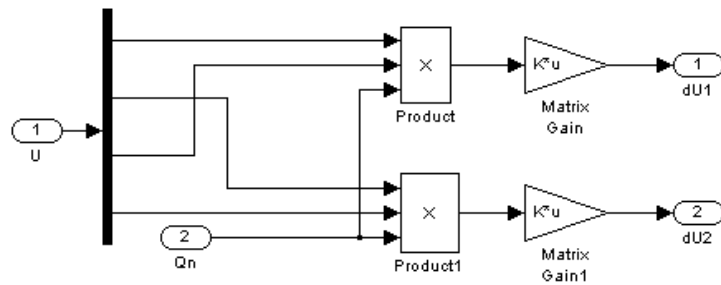


Рис. 4.5 Підсистема Subsys23 в пакеті Simulink

Сума добутоків масивів Sect1–7 на вектор $X+$ (Subsys25, рис. 4.6) характеризує вплив усіх секцій, по яким вже вироблене рішення про включення, на станові параметри системи. Просумувавши отримані значення з початковими значеннями симетричних складових напруг $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$. Опісля перетворення їх маємо напруги фаз U_A , U_B , U_C (Subsys26, рис. 4.7).

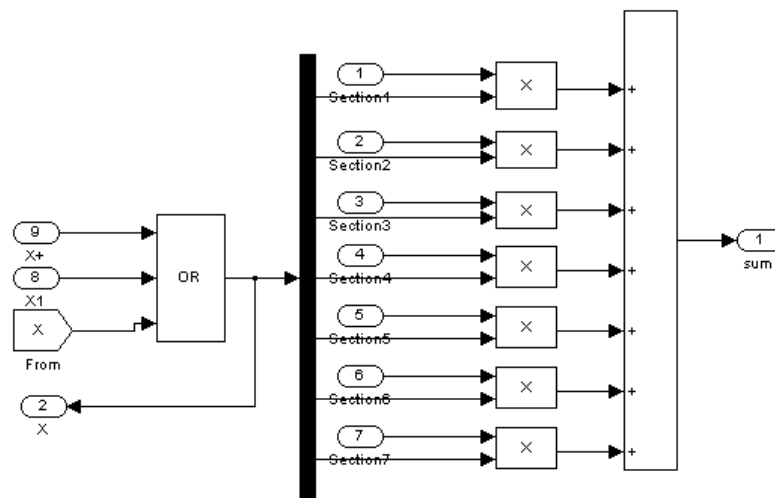


Рис. 4.6 – Підсистема Subsys25 в пакеті Simulink

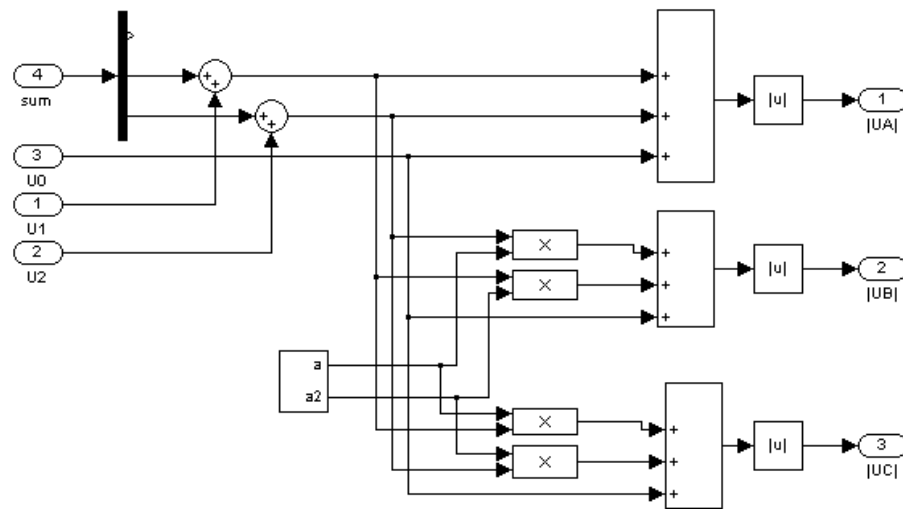


Рис. 4.7 – Підсистема Subsys26 в пакеті Simulink

Підсистема обчислення післядії Subsys27, рис. 4.8, містить чотири підсистеми Subsys271–274, що резервують роботу підсистем Subsys23–26 із наступним виведенням значень Q_f , k_{2U} , Q_{lin} .

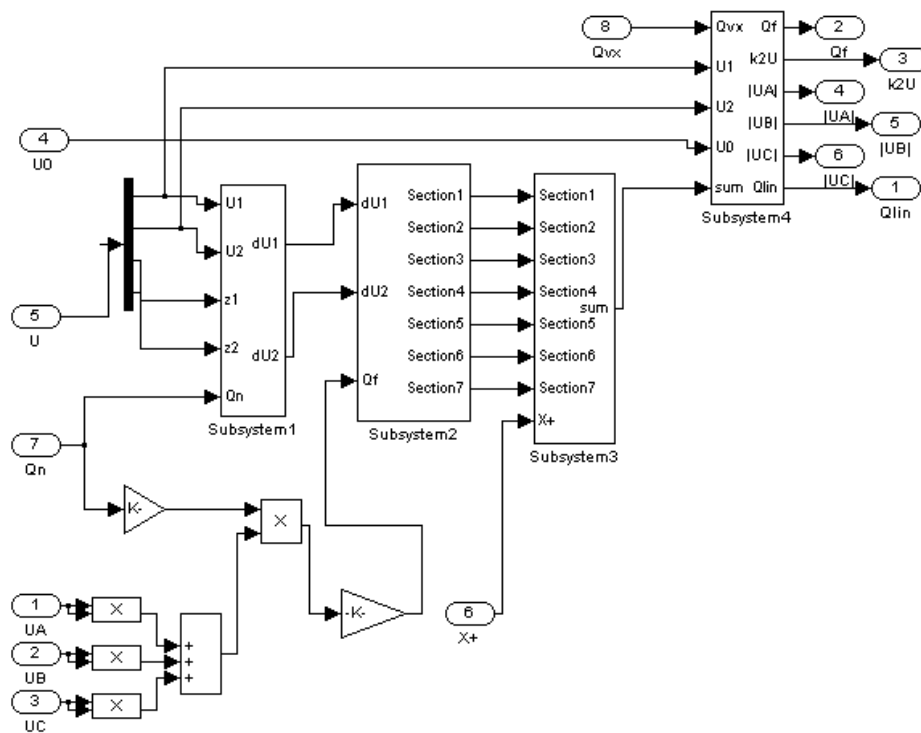


Рис. 4.8 – Підсистема Subsys27 в пакеті Simulink

У підсистемі Subsyst28, рис. 4.9, порівнюється значень Q_f , k_{2U} , U_A , U_B , U_C із припустимими Q_{dop} , k_{2Udop} , U_{fdop} . При дотриманні всіх умов на виході виробляється сигнал $umovaHI$, в противному разі $umovaHI = 0$.

На вхід Subsyst29 надходять сигнал $umovaHI$, числовий номер секції IND , вибраної для включення на даному кроці, вектор X . Коли одне із обмежень матмоделі не виконується, тобто $umovaHI = 0$, оператор switch-case записує «0» для елемента вектора X за номером IND . Получений вектор X передається на запам'ятовуючий елемент підсистеми Subsyst210.

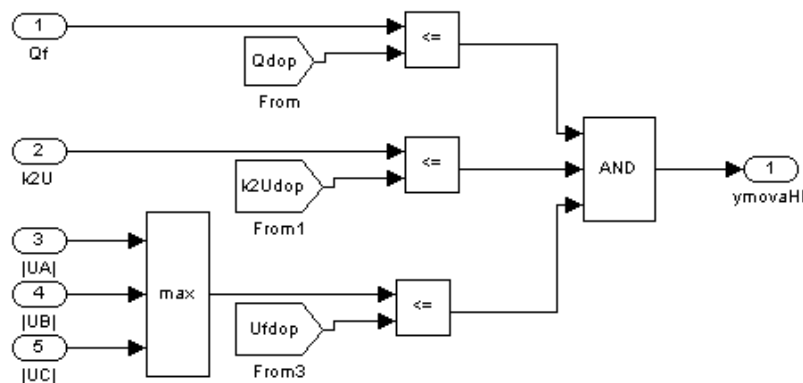


Рис. 4.9 Підсистема Subsyst28 в пакеті Simulink

Дані що до обрахування вектора управління виконані за вихідними даним в параграфі 3.8 повністю співпадають. Це самим доводять правильність виконаного моделювання СПР

Відзначимо властивості створеної СПР.

1. Створена СПР для своєї роботи вимагає знання опорів електромережі для струмів прямої та оберненої послідовностей, якими фактично відбувається моделювання об'єкту керування відносно вивчаємих явищ.

2. СПР включає відомості про пристрій управління, які задаються у вигляді потужностей секцій БК.

Отже, створена СПР включає всі елементи системи управління і її можна застосувати комп'ютерного моделювання оптимального управління реактивним навантаженням.

4.2 Оптимальне управління реактивним навантаженням

4.2.1. Технологія здійснення комп'ютерного моделювання.

Скористаємося створеною моделлю системи управління для комп'ютерного моделювання. Для цього використані параметри режиму в електромережі Кіровоградського РЕМ ПрАТ «Кіровоградобленерго», отримані експериментальними дослідженнями.

Для кожного i -го виміру режимних параметрів рахувалися вектори управління для таких випадків:

- без урахування впливу БК на несиметричність та відхилення напруги (далі випадок 1);
- з урахуванням впливу БК на згадані параметри за матмоделлю (3.4) (далі випадок 2).

Одночасово обчислювалися відповідні значення таких управляємих режимних параметрів, що встановляться при реалізації знайдених векторів управління:

- РП генерована БК;
- коефіцієнта несиметричності напруг по оберненій послідовності;
- напруги у фазі, в якій вихідна її величина найвища.

Така технологія комп'ютерного моделювання дала можливість отримати графіки управляємих режимних параметрів для випадків 1 та 2, які для наочності можна подати в одних осях із відповідними некерованими графіками.

Некеровані графіки РП навантаження, що підключене до шин ТП, напруги у фазі С та коефіцієнтів несиметричності напруг по оберненій послідовності представлені на рис. 4.10.

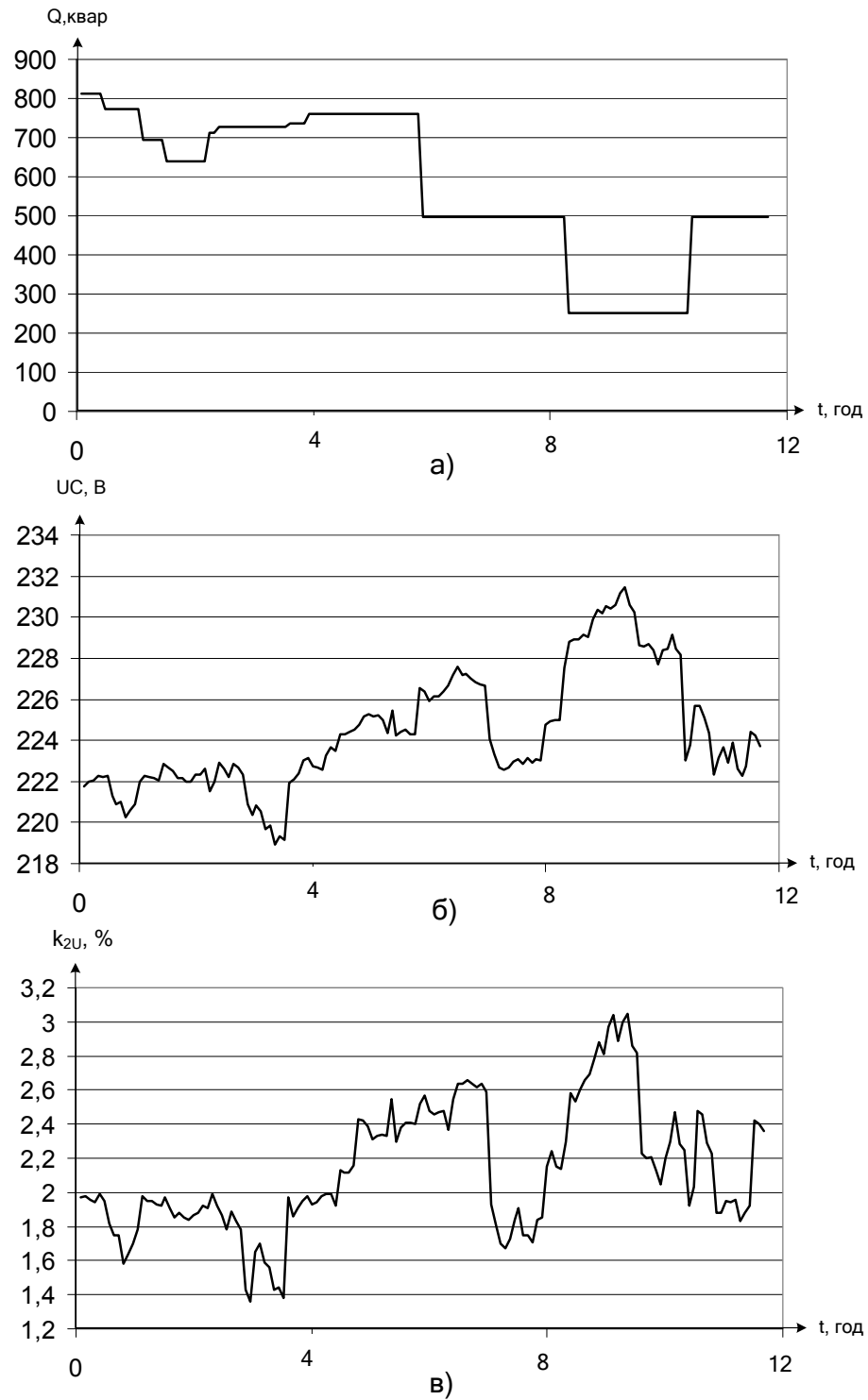


Рис. 4.10 Вихідні тренди керованих параметрів: а) $Q(t)$; б) $U_C(t)$; в) $k_{2U}(t)$

4.2.2. Оптимальне управління реактивним навантаженням БК з однаковими міжфазними ємкостями. Моделювання оптимального управління виконано в припущенні, що до шин НН ТП підключена БК з наступними потужностями секцій: 450 квар; 300 квар; 225 квар; 150 квар; 90 квар; 60 квар, 30 квар зі схемою сполучень трикутником. Керуючі рішення визначалися за матмоделлю (3.4).

На рис. 4.11 приведені графіки РП ТП і РП генерованої БК при втіленні вектора управління для випадків 1 та 2.

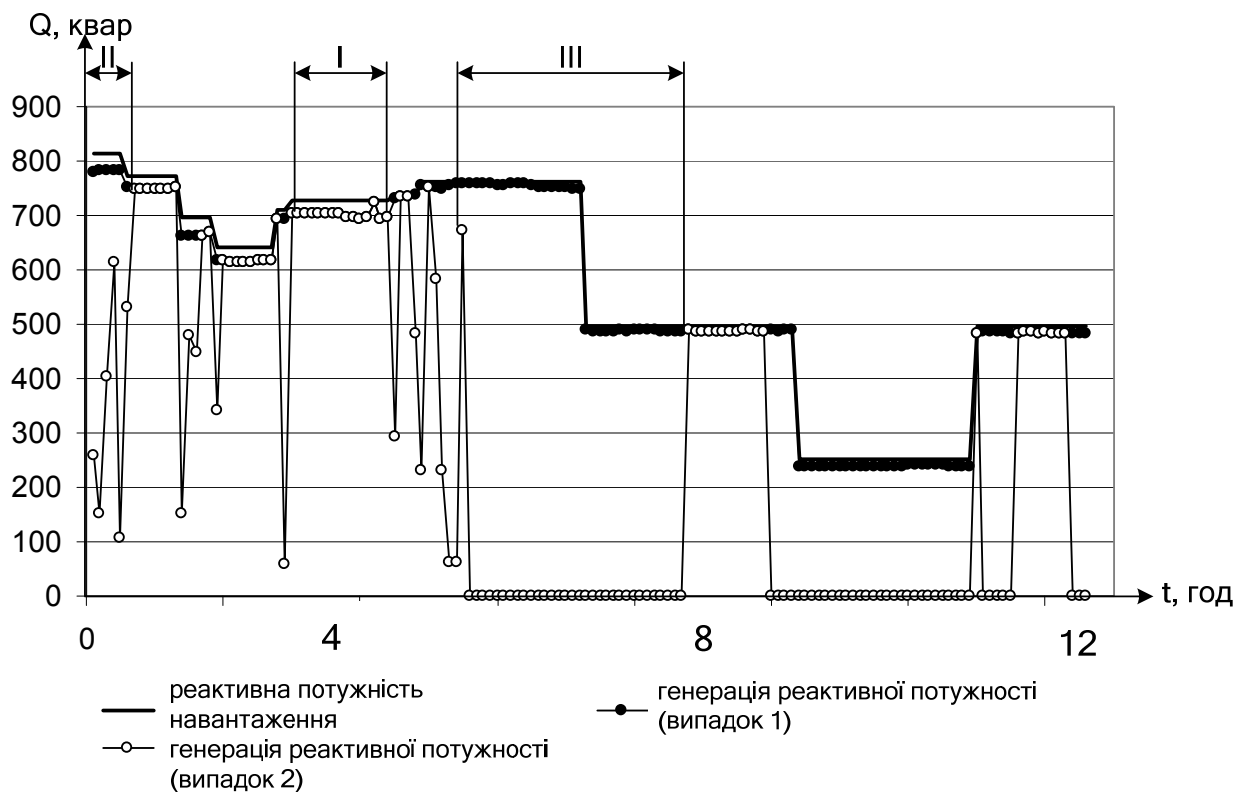


Рис. 4.11 Криві споживання та генерування РП

Управління за першим випадком забезпечує графік генерування РП наближений до графіка її споживання. Втілення цього варіанту управління супроводжується ростом кількості випадків порушення норм якості електроенергії по показникам k_{2U} та δU_y і тому незадовільна.

Зображені графіки ілюструють можливі наслідки управління реактивним навантаженням в умовах несиметричності напруг. На рис. 4.11 відмічені такі інтервали часу:

I – управління в случаях 1 та 2 співпадають, контрольовані величини k_{2U} та δU_y лежать в допустимих межах за ГОСТ 13109-97;

II – потужність ввімкнених БК обмежена порівняно з случаем 1, адже надлишкове їх включення буде супроводжуватись порушенням норм за величинами показників k_{2U} та (або) δU_y ;

III – для вихідного стану притаманне відхилення від норм стандарту значень k_{2U} та (або) δU_y ; секції БК лишаються вимкненими у случаї 2.

В загальному отримані результати з управління реактивним навантаженням можна оцінити наступним чином:

- в 62% випадків вектор управління потрібно приймати із врахуванням впливу на несиметричність та відхилення напруги;
- в 38% вектор управління співпадає з отриманим при управлінні, яке не враховує вплив на якість електроенергії.

Графіки напруги у фазі з найбільшим значенням напруги (фаза С) та коефіцієнтів несиметричності напруги по оберненій послідовності відповідних природному режиму та режимам для случаїв 1 і 2, показані на рис. 4.12 - 4.13.



Рис. 4.12 Криві зміни напруги фази С до включення БК та після

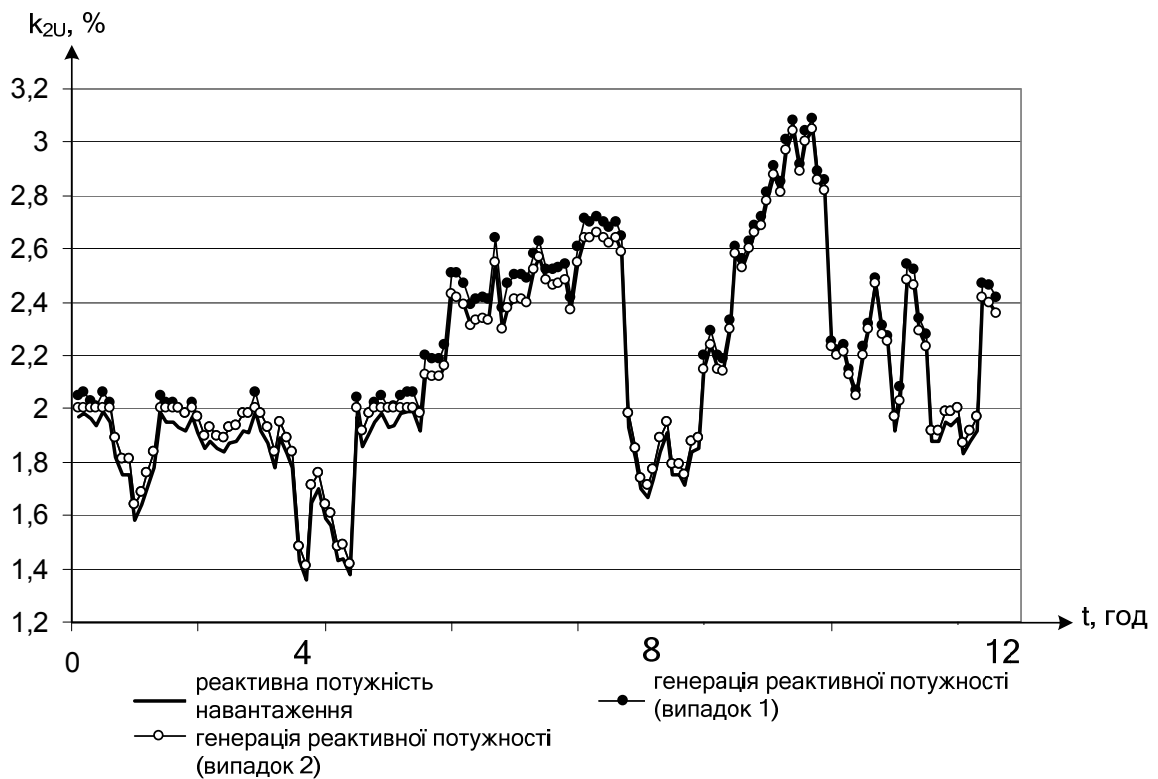


Рис. 4.13 Криві зміни k_{2U} до включення БК та після

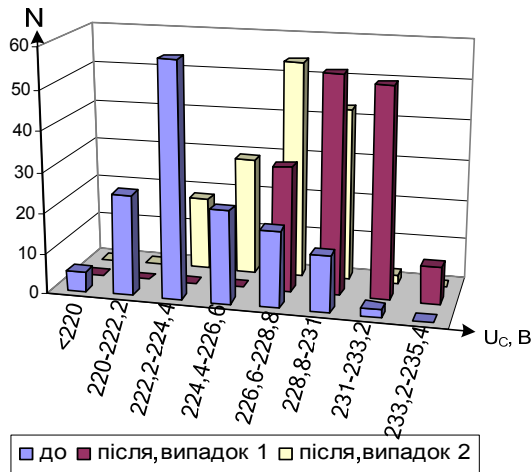
Відповідно з ГОСТ 13109-97 оцінювання якості електроенергії виконується за результатами статистичної обробки даних спостережень [12]. Такий аналіз полягає у визначенні відсотку випадків, коли результати спостережень входять в інтервали нормально допустимих значень (їх повинно бути $\geq 95\%$), а результати спостережень, які лежать за межами гранично допустимих величин не повинні фіксуватись. Коли випадок управління не змінює відсоток спостережень по величинам δU_y , k_{2U} в будь-яких із визначених в ГОСТ 13109-97 діапазонах порівняно із некерованим процесом, то можна вважати, що таке управління не порушує якості електроенергії.

Дані результатів статистичного аналізу впливу на контрольовані показники якості електроенергії показані в табл. 4.1.

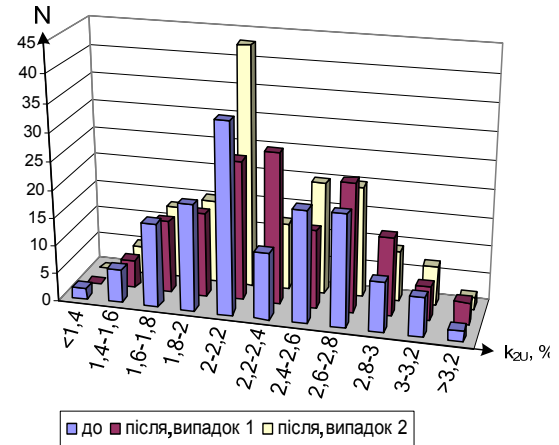
Таблиця 4.1. Дані результатів статистичної обробки по розглянутих варіантах

Розглядувані варіанти управління	Контрольовані ПЯЕ			
	δU_y у фазі С		k_{2U}	
	Кількість спостережень, %			
	Припустимі межі	Неприпустимі межі	Припустимі межі	Неприпустимі межі
Вихідний режим	99	0	53	0
Випадок 1	57	0	43	0
Випадок 2	99	0	53	0

Виконано аналіз впливу на контрольовані ПЯЕ для окремих діапазонів в нормально і гранично допустимих межах. З цією метою дані дослідів, табл. 4.2 - 4.3, та гістограми величин δU_y , k_{2U} , рис. 4.14, де N – число спостережень зафіксованих у відповідному часовому інтервалі.



а)



б)

Рис. 4.14 Гістограма розподілу: а) напруги фаз С; б) коефіцієнт k_{2U}

Таблиця 4.2. Дані статистичних спостережень напруги фази С

Діапазон напруг	Число значень до ввімкнення БК	Число значень після ввімкнення БК для случая 1	Число значень після ввімкнення БК для случая 2
<220	6	0	1
220–222,2	26	1	0
222,2–224,4	57	0	17
224,4–226,6	22	0	28
226,6–228,8	18	31	53
228,8–231	15	54	44
231–233,2	1	53	2
233,2–235,4	1	9	0
>235,4	0	1	0

Таблиця 4.3 – Дані статистичних спостережень k_{2U}

Діапазон k_{2U}	Число значень до ввімкнення БК	Число значень після ввімкнення БК для случая 1	Число значень після ввімкнення БК для случая 2
<1,2	0	0	1
1,2–1,4	3	1	0
1,4–1,6	7	5	6
1,6–1,8	14	13	14
1,8–2	18	15	16
2–2,2	33	25	42
2,2–2,4	11	37	11
2,4–2,6	21	14	21
2,6–2,8	21	23	21
2,8–3	8	14	8
3–3,2	6	6	6
>3,2	3	4	5

Для розглянутого вихідного режиму зазначимо.

1. Для природного режиму притаманне порушенням норм якості електроенергії за величиною коефіцієнта несиметричності напруг по оберненій послідовності - k_{2U} та відхилення напруги – δU_y . По цій причині потрібно до здійснення управління реактивним навантаженням за допомогою БК вжити технічних заходів, які забезпечують дотримання якості електроенергії по зазначеним показникам. Одним із виходів може бути використання симетруючих пристроїв [9, 23, 24] або здійснити переключення регулювального навантаження на трансформаторі.

2. Оптимальне управління реактивним навантаженням за допомогою створених математичних моделей не призводить до порушення стану якості електроенергії.

3. Використана при комп'ютерному моделюванні БК в разі нехтування несиметричністю напруг дає змогу забезпечити графік генерування РП наближений до графіка її споживання РП. Стан якості електроенергії по відхиленню напруги та коефіцієнту несиметричності напруг по оберненій послідовності став гіршим. Тому ряд управляючих треба визнати недопустимими.

4. Результати моделювання можливих варіантів управління реактивним навантаженням за допомогою БК з рівними міжфазними ємкостями, показані на рис. 4.11 – 4.13, переконують про необхідність врахування несиметричності напруг у вузлі підключення БК.

4.3 Технічні заходи для ефективного оптимального управління

Получені результати моделювання з застосуванням секцій БК з рівними міжфазними ємкостями в умовах несиметричності напруг дають можливість сформулювати технічні заходи забезпечуючі необхідний рівень компенсації РП для таких найхарактерніших варіантів.

1. Потужність включених секцій БК обмежується допустимим значенням k_{2U} . Управління реактивним навантаженням потрібно виконувати за алгоритмом:

- по матмоделлі (3.4) виробити рішення по секціях БК з однаковими міжфазними ємкостями;
- у разі досягнення k_{2U} допустимого рівня подальше управління реактивним навантаженням виконувати симетрувальними секціями БК одночасово забезпечуючи симетрування напруг (за матмоделлю (3.7)).

2. Вихідному режиму притаманне недопустиме значення k_{2U} .

Управління слід робити так:

- виконати внутрішнє симетрування навантажень, потім до точки мережі підключити некеровану несиметричну БК, яка розрахована на зниження, наприклад, маточікування напруги оберненої послідовності;

- наступний процес управління здійснювати як для случая 1.

3. В процесі управління РП параметром обмеження є відхилення напруги в одній із трьох фаз. Міри із управління такі:

- змінити положення регулювальної відпайки трансформатора;

- процес управління виконувати як для случая 1.

4. Вихідному режиму притаманні одночасово неприпустимі значення k_{2U} та δU_y . потрібно:

- змінити положення регулювальної відпайки трансформатора;

- виконати внутрішнє симетрування навантажень, потім підключити некеровану несиметричну БК, що розрахована на зниження маточікування напруги оберненої послідовності;

- процес управління здійснювати як для случая 1.

В використовуваних варіантах заходів управління реактивним навантаженням за допомогою БК із врахуванням несиметричності напруг в мережі застосовуються розроблені матмоделі.

Виконані дослідження по ефективності управління реактивними навантаженнями за розробленими матмоделями для випадку, коли відповідними мірами забезпечені припустимі за ГОСТ 13109-97 k_{2U} та δU_y .

Для прийняття управляючих рішень по секціях БК із однаковими міжфазними ємкостями використана створена модель СУ, а рішення по симетрувальним секціям обчислювалися за допомогою прикладного пакету MathCad. Керуючі рішення приймалися за матмоделями (3.4) та (3.7).

В дослідженнях застосовані результати експериментальних вимірювань, виконаних в Кіровоградських РЕМ ПрАТ «Кіровоградобленерго». Як засіб управління використана БК з такими параметрами секцій з рівними міжфазними ємкостями: 450 квар; 300 квар; 225 квар; 150 квар; 90 квар; 60 квар; 30 квар та параметрами симетруючих секцій, які комутуються на напругу U_{AB} : 40 квар; 20 квар; 10 квар; 5 квар, те саме, U_{BC} : 40 квар; 20 квар; 10 квар; 5 квар, те саме, U_{CA} : 40 квар; 20 квар; 10 квар; 5 квар.

Результати такого управління показані на рис. 4.16, де в одних осях накладені графіки споживання і генерування РП $Q(t)$ та $k_{2U}(t)$ для початкового режиму, для режиму забезпечуючого реалізацією вектора управління по секціях БК з однаковими міжфазними ємкостями (обрахованого за матмоделлю (3.4)), а й теж графіки, що забезпечуються за умови втілення додатково рішення по симетруючим секціям (обрахованого за моделлю (3.7)).

Як бачимо із графіків в процесі оптимального управління реактивним навантаженням забезпечена ефективна компенсація РП (графіки споживання та генерування РП майже збігаються). Одночасово забезпечено нормоване k_{2U} .

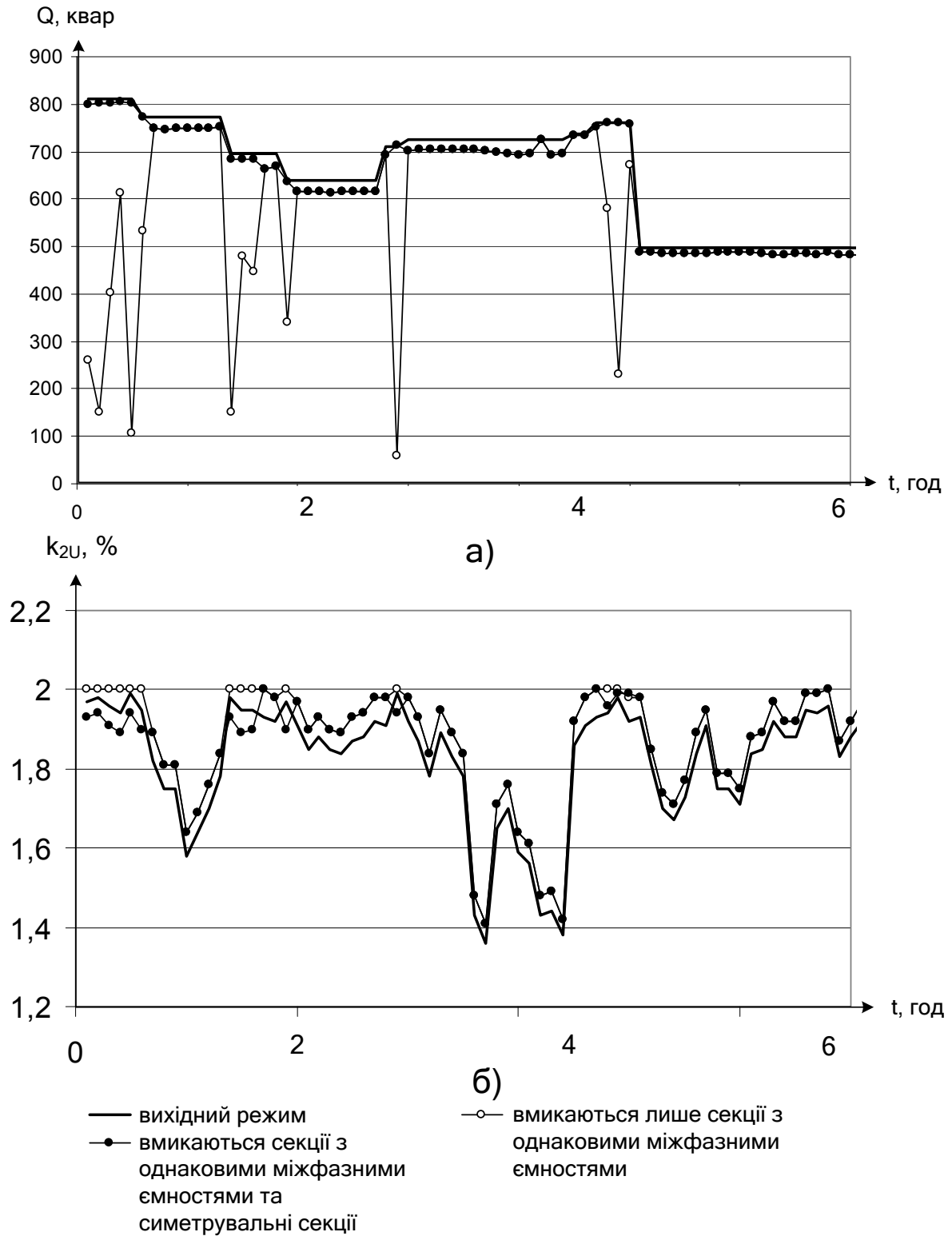


Рис. 4.15 Траєкторії параметрів, на які чиняться управляючі впливи до та після включення БК: а) споживання та генерування РП; б) динаміка $k_{2U}(t)$

4.4 Висновки за четвертим розділом

1. Створена модель пристрою прийняття управляючого діяння, яка втілена в пакеті Matlab, дозволяє визначити вектор управління за розробленими матмоделями, що доведено тесту вальним прикладом та може бути використана в якості комп'ютерної моделі оптимального управління реактивним навантаженням.

2. Дані виконаного комп'ютерного моделювання, яке реалізованого на основі реальних вихідних даних, отриманих експериментально, довели необхідність прийняття рішень з управління РП, враховуючи впливи на параметри несиметричності і відхилення напруги.

3. Управління РП за створеними матмоделями не призводять до порушень стану якості електроенергії за відхиленням напруги та коефіцієнтом несиметричності напруг по оберненій послідовності, що доведено експериментально.

4. Графіки генерування РП БК відповідних випадкам, коли управління реалізується з врахуванням та без врахування чинника несиметричності напруг суттєво відмінні.

5. У випадку характеристики режиму відхиленнями від стандартизованих норм, то для їх забезпечення потрібно перш за все скористатися відповідними технічними засобами. При цьому ефективне управління реактивним навантаженням можна забезпечити за допомогою БК з секціями з однаковими міжфазними ємкостями та симетрувальні секції, використовуючи розроблені матмоделі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано теоретичне узагальнення та нове рішення актуальної науково-практичної задачі оптимального управління реактивним навантаженням за допомогою БК в умовах несиметричності режиму, що дозволить зменшити втрати активної потужності в електричних мережах без погіршення показників якості електроенергії, що ними нормується несиметричність та відхилення напруги.

1. Сучасні існуючі методи і способи управління РП за допомогою БК здійснюють управління, забезпечуючи мінімальний рівень активних втрат в електричній мережі або необхідні величини напруги, без урахування рівня несиметричності напруг у вузлі електромережі.

2. Ріст показників несиметричності та відхилення напруг виникає при включенні БК, може сягти величин неприпустимих згідно ГОСТ 13109-97 або технологічних умов експлуатації або електрообладнання. Зазначений вплив БК на параметри електричного режиму слід брати до уваги залежно від вихідної величини відхилення напруги, напруги оберненої та нульової послідовностей у точці підключення БК, їх потужності та опору електромережі.

3. Оптимальне управління реактивним навантаженням в умовах несиметричності напруг варто реалізовувати з використанням в якості критерію ефективності коефіцієнтів несиметричності напруг по оберненій та нульовій послідовності (розраховані як результат ділення відповідних напруг до номінальних напруг) або напруги оберненої та нульової послідовностей, які віддзеркалюють тренд зміни збитків від несиметричності режиму.

4. Розроблено матмоделі для відшукування оптимального вектора управління РП в умовах несиметричності напруг електромережі з урахуванням впливу БК на параметри електричного режиму.

5. Втілення на практиці реалізованих наукових розробок дасть змогу знизити рівень втрат активної потужності, дотриматись вимоги з компенсації РП без порушення положення з якістю електроенергії по несиметричності та відхиленню напруги.

6. Получені наукові результати підтвердилися під час комп'ютерного моделювання праці системи оптимального управління РП.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жежеленко И. В. Реактивная мощность в системах электроснабжения: [учебное пособие] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – К. : УМК, 1989. – 108 с.
2. Давидов О. Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О. Ю. Давидов, О. В. Бялобржеський // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №3(62) Частина 1. – С. 132 – 136. – ISSN 1995–0519.
3. Рогальський Б. С. Проблеми енергозбереження. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах: [навчальний посібник] / Б. С. Рогальський. – Вінниця : ВДТУ, 1996. – 112 с.
4. Рогальський Б.С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Ч.1 / Рогальський Б.С. – Вінниця, ВДТУ, 2002. – 119 с.
5. Богаенко И. Н. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности / [Богаенко И. Н., Борисенко В. Я., Лозинський Д. И., Рюмшин Н. А.] – К.: „Техніка”, 1992.–152 с.
6. Варецький Ю. О. Увімкнення конденсаторних батарей в системі електропостачання з частотно-регульованими електроприводами / Ю. О. Варецький, М. Д. Федонюк, В. Г. Гапанович // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2011. – №.707. – С. 22–28. – ISSN 0321–0499.
7. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И. В. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 166 с.
8. Владимиров Ю. В. Учет фактора влияния несимметрии нагрузки на потери в электрических сетях от перетоков реактивных мощностей /

Ю. В. Владимиров, Т. В. Крамская // Энергетика та електрифікація. – 2007. – №1. – С. 63–67. – ISSN 0424–9879.

9. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / Кузнецов В. Г., Григорьев А. С., Данилюк В. Б. – К. : Наукова думка, 1992. – 240 с.

10. Гриб О.Г. Оцінка якості електроенергії в сільських електричних мережах / [Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Довгалюк О.М., Калюжний Д.М.] // Вісник національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Том 2. – 2008 – № 37 – С. 42–45.

11. Гриб О. Г. Забезпечення якості електричної енергії на спортивному комплексі «Металіст» / О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, О. П. Лазуренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11(186). – С. 107 – 111. – ISSN 2074–2630.

12. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.

13. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И. В., Рабинович М. Л., Божко В. М. – К. : Техніка, 1981. – 160 с.

14. Червінська Т.М. Аналіз впливу батарей статичних конденсаторів на роботу системи електропостачання з несиметричною напругою / Л. Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №2. – С. 39–43.

15. Варецький Ю. О. Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень / Варецький Ю. О. // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 2. – С. 66–70. – ISSN 0204–3599.

16. Варецький Ю. О. Інтелектуальна система ідентифікації впливу компенсувальних засобів на несинусоїдний режим електричної мережі / Варецький Ю. О., Наконечний, Т. І. // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – №654. – С. 124-127. – ISSN 0321–0499.

17. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.

18. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.

19. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А. А.Федорова.– М. : Энергоатомиздат, 1986.–568с.

20. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 2. Технические сведения об оборудовании / Под общ. ред. А. А.Федорова и Г. В. Сербиновского. – М. : Энергия, 1974.–528с.

21. Черемисин Н. М. Оптимизация режима напряжения распределительных электрических сетей сельского назначения / Черемисин Н. М., Довгалюк О.Н. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – Т.1, № 19. – С. 82–90.

22. Довгалюк О. Н. Учет влияния вероятностного характера нагрузок электрических сетей на величину показателей качества электроэнергии / Довгалюк О. Н. // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – 2003. – № 11. – С. 41–52. – ISSN 2078–774X.

23. Гриб О. Г. Ймовірність розподілу відхилення напруги в електричних мережах зовнішнього освітлення / О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, О. В. Саприка //

Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4(63). Частина 1 – С. 94 – 97. – ISSN 1995–0519.

24. Шишкин С. А. Симметрирование и компенсация реактивной мощности несимметричных низковольтных нагрузок с помощью конденсаторных батарей / С. А. Шишкин // Электротехника. – 2006. – №8. – С. 42–46. – ISSN 0013–5860.

25. Шишкин С. А. Построение схем измерения входных параметров регуляторов реактивной мощности конденсаторных установок / С. А. Шишкин // Электротехника. – 2003. – №10. – С. 52–55. – ISSN 0013–5860.

26. Шишкин С. А. Автоматическое управление конденсаторными установками по току нагрузки / С. А. Шишкин // Электрика. – 2002. – №5. – С. 33–35.

27. Лебедин А. А. Повышение эффективности конденсаторных установок / А. А. Лебедин, Н. И. Джус // Промышленная энергетика. – 1996. – №1. – С. 34–35.

28. Дубинский Е. В. Анализ влияния степени компенсации реактивной мощности и уровня напряжения на значение активной мощности, потребляемой от источника питания, с учетом статических характеристик нагрузки / Е. В. Дубинский, Е. А. Конюхова // Промышленная энергетика. – 1996. – №4. – С. 35 – 39.

29. Дубинский Е. В. Определение степени компенсации реактивной мощности при заданных диапазонах уровней напряжения в узлах электрической сети 10/0,4 кВ по условию уменьшения потребления активной мощности от источника питания / Е. В. Дубинский, Е. А. Конюхова // Промышленная энергетика. – 1996. – №8. – С. 38–41.

30. Конюхова Е. А. Выбор мощности батарей конденсаторов в цеховых сетях промышленных предприятий с учетом режимов напряжения / Е. А. Конюхова // Электричество. – 1998. – №1. – С. 18–25. – ISSN 0013–5380.

31. Искра В. Д. Компенсация реактивной мощности / В. Д. Искра, А. А. Квицинский, Л. Н. Кудачкий // Энергетика та електрифікація. – 2006. – №5. – С. 38–42. – ISSN 0424–9879.

32. Ковалев Е. Б. Математическое моделирование асинхронного двигателя при компенсации реактивной мощности с помощью статических конденсаторов / Ковалев Е. Б., Толочко О. И., Чекавский Г. С. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2000. – №2 – С. 287 – 294. – ISSN 1995–0519.

33. Качан Ю. Г. Влияние способов компенсации реактивной мощности на эффективность промышленных электрических сетей / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2005. – №4(33) – С. 60 – 63. – ISSN 1995–0519.

34. Заїка В. Т. Оцінка впливу відхилень напруги на рівень компенсації реактивних навантажень / В. Т. Заїка, В. В. Самойленко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2007. – №3(44) Частина 1. – С. 100 – 102. – ISSN 1995–0519.

35. Веников В.А. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, А.А. Жуков, Л.А. Солдаткина. – М. : Высшая школа, 1971. – 440 с.

36. Токарев Б.Ф. Электрические машины / Токарев Б.Ф. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

37. Пинчук О. Г. Оценка теплового состояния асинхронного двигателя по данным контроля токов статора при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук, И. П. Кутковой // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – №9(158). – С. 190 – 196. – ISSN 2074–2630.

38. Жежеленко И. В. Влияние отклонений напряжения питающей сети на срок службы асинхронных двигателей / Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л., Швецова И. А. // Промелектро. – 2005. – № 6. – С. 33 – 35.

39. Сычев С. Д. Режимы работы асинхронного двигателя при несимметрии питающего напряжения / Сычев С. Д., Черный А. П. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2002. – №1 – С. 266 – 269. – ISSN 1995–0519.

40. Математическая теория оптимальных процессов / [Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.] – М. : Наука, 1983. – 392 с.

41. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления / Болтянский В. Г. – М. : Наука, 1966. – 408 с.

42. Табак Д. Оптимальное управление и математическое программирование / Д. Табак, Б. Куо. – М. : Наука, 1975. – 280 с.

43. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Веников В.А, Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. – М.: Энергоатомиз., 1981. – 464 с.

44. Аввакумов В.Г. Методы нескалярной оптимизации и их приложения / В.Г. Аввакумов. – К.:Вища школа, 1990. – 188 с.

45. Аввакумов В.Г. Решение задачи с нескалярным целевым функционалом при расчете электроэнергетических систем / В. Г. Аввакумов. // Электричество. – 1982. – №9. – С. 5–10. – ISSN 0013–5380.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

Одним із заходів, які забезпечують безпеку робіт в електроустановках являється захисне заземлення.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, що можуть опинитися під напругою через замкнення на корпус та по іншим причинам.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки ураження електричним струмом у випадку торкання до корпусу електроустановки і до інших неструмоведучих металічних частин, які опинилися під напругою через замкнення на корпус та з інших причин.

Захисне заземлення необхідно відрізнити від робочого та заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення – це навмисне сполучення із землею точок струмового кола, наприклад, нейтральних точок обмоток силових і вимірювальних трансформаторів, генераторів, реакторів компенсації в дальніх ЛЕП, та фази у випадку використання землі у якості фазного або зворотного провідника. Робоче заземлення призначене для забезпечення правильної роботи електроустановки в нормальних або аварійних умовах та здійснюється безпосередньо (за рахунок з'єднання провідником частин, які заземлюються із заземлювачем) або через спеціальні апарати – розрядники, резистори, пробивні запобіжники та ін..

Заземлення блискавкозахисту – це навмисне приєднання до землі блискавкоприймачів та розрядників з метою відводу струмів блискавки від цих пристроїв в землю.

Принцип роботи захисного заземлення полягає у зниженні до безпечних значень напруги доторкання та крокової напруги, що обумовлені

замкненням на корпус та ін. причинами. Це досягається шляхом зниження потенціалу заземленого обладнання, та шляхом вирівнювання потенціалів заземленого обладнання і основи, на якій стоїть людина.

Область застосування захисного заземлення:

- електричні мережі напругою до 1 кВ змінного струму – однофазні двопроводні, трифазні трипроводні, та мережі постійного струму;
- електричні мережі напругою вище 1 кВ змінного та постійного струму з довільним режимом нейтралі.

Захисне заземлення є найбільш простим та дуже ефективним технічним засобом захисту від враження електричним струмом при появі напруги на металевих частинах.

У відповідності з ПУЕ, усі металеві частини електроустановок, що в процесі експлуатації не мають з'єднання з струмопровідними елементами, проте можуть потрапити під напругу, необхідно заземлювати.

Проведемо розрахунок заземлення для наступного випадку.

ТП напругою 10/0,4 кВ зі сторони низької напруги мають глухозаземлену нейтраль. Схема з'єднання обмоток силових трансформаторів – «трикутник/зірка з нулем». Струм замикання на землю складає 27 А. Для цехового устаткування використовується заземлення. Цехові трансформаторні підстанції отримують живлення від двох кабелів, які прокладені в одній траншеї. Кліматичний район – 2-й, тип ґрунту – супісь.

Розрахунок заземлення зводиться до визначення вертикальних заземлювачів та довжини з'єднувальної смуги.

1. Визначається значення норми на опір заземлення R_3^H . Якщо пристрій заземлення використовується одночасно для електричних установок напругою до 1 кВ та вище 1 кВ:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом}$$

Згідно з ПУЕ, для випадку, коли сумарна потужність струмоприймачів більша, ніж 100 кВА то опір R_3 повин бути ≤ 4 Ом. Приймаємо $R_3 = 4$ Ом.

2. Визначаємо питомий розрахунковий електричний опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{\text{табл}}$ – довідникове (табличне) значення, для супіску $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

ψ – підвищувальний коефіцієнт, приймається рівним $\psi = 1,4$.

3. Опір вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{350}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{0,025} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 20,36 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина заземлювача, $l = 5$ м;

d – діаметр заземлювача $d = 0,025$ м).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де h – глибина прокладання смуг (згідно ПУЕ складає 0,5...0,8 м).

Приймаємо до встановлення електроди прокладені по замкнутому контуру та визначаємо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3 \eta_f} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт.}$$

4. Довжина горизонтальної смуги:

$$l_n = 1,05 an = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м}$$

5. Опір цієї смуги з урахуванням екранування:

$$R_{\pi} = 0,366 \frac{\rho_{\text{посп}}}{l_n \eta_n} \lg \frac{2l_n^2}{bn} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом.}$$

6. Необхідний опір вертикальних заземлювачів із врахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{\text{тр}} = \frac{R_{\pi} R_3^H}{R_{\pi} - R_3^H} = \frac{24 \cdot 4}{24 - 4} = 4,8 \text{ Ом.}$$

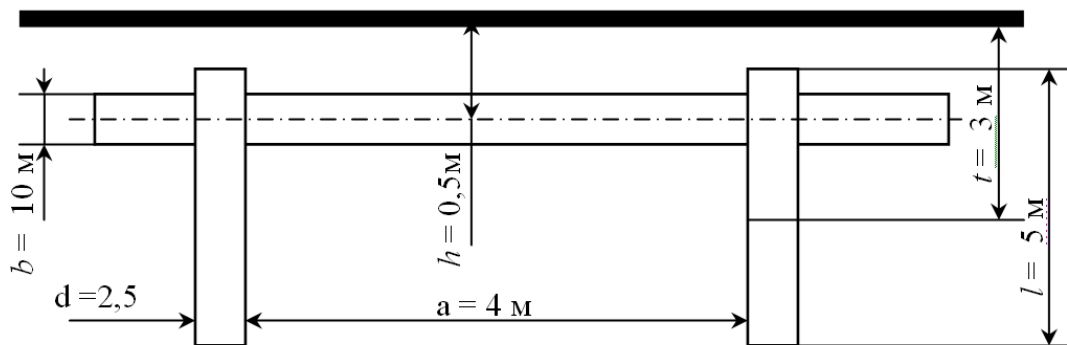


Рис. А.1. Схема прокладання заземлення

7. Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{\text{тр}} \eta_o} = \frac{20,361}{4,8 \cdot 0,59} = 7,49 \approx 8 \text{ шт.}$$

8. Проводимо перевірку опору заземлювача та порівнюємо отримане значення з нормованим:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{тр}}} + \frac{1}{R_{\pi}}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}$$

Опір розрахованого заземлюючого пристрою з восьма заземлювачами не перевищує допустимого значення.