

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“___” _____2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Оптимальна система автоматичного керування
параметрами режиму розподільних електричних
мереж за умов несиметрії напруг”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Владислав ОЛІЙНИК
«___» _____2022 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
«___» _____2022 р.
Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

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 Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2022 р.

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

Олійника Владислава Сергійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оптимальна система автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж за умов несиметрії напруг

The optimal system of automatic control of the mode parameters of distribution electric networks under conditions of voltage asymmetry

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, 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 даного дослідження є зниження рівнів споживання РП, а також зниження рівнів несиметрії напруг та усталеного відхилення напруг в РЕМ за рахунок автоматизації процесу керування параметрами режиму РЕМ з допомогою СКП. Завдання роботи: 1. Провести аналіз існуючих технічних засобів і методів компенсації РП та симетрування напруг в РЕМ, та існуючих методів їх автоматизації з метою визначення їх недоліків. 2. Формалізувати задачі керування параметрами режиму РЕМ з СКП для забезпечення одночасного зниження споживання РП, рівнів несиметрії а також усталеного відхилення напруг, та здійснити обґрунтування методу розв'язання описаних задач. 3. Розробити структурні схеми оптимальних САК параметрами режиму РЕМ з СКП. 4. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК параметрами режиму РЕМ з СКП.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</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
1	<i>Вступ</i>	4.10.22	
2	<i>Аналіз сучасного стану проблеми автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж</i>		
3	<i>Математичне моделювання систем автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж</i>	14.10.22	
4	<i>Комп'ютерне моделювання оптимальної системи автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж</i>	5.11.22	
5	<i>Охорона праці</i>	5.11.22	
6	<i>Техніко-економічна оцінка ефективності застосування розробленої системи автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж</i>	18.11.22	
7	<i>Висновки</i>	21.11.22	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.22	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.22	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Олійник В. С. Оптимальна система автоматичного керування параметрами режиму розподільних електричних мереж за умов несиметрії напруг.

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

Метою роботи є зниження рівнів споживання реактивної потужності, а також зниження рівнів несиметрії напруг та усталеного відхилення напруг в розподільних електричних мережах за рахунок автоматизації процесу керування параметрами режиму розподільної електричної мережі з допомогою симетрокомпенсувальних пристроїв.

В роботі було проведено аналіз відомих технічних засобів компенсації реактивної потужності. Цей аналіз показав, що найбільш досконалим технічним засобом є батареї статичних конденсаторів з регульовальними секціями, за допомогою яких можна здійснювати автоматичне керування параметрами режиму розподільної електричної мережі.

Створені на основі знайдених розв'язків задачі керування структурна схема системи автоматичного керування і алгоритм розрахунку оптимального вектора керування дали змогу розробити комп'ютерні моделі розподільних електричних мереж з симетрокомпенсувальними пристроями.

Проведений аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування параметрами режиму розподільних електричних мереж шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання засвідчив перевагу розробленої в роботі системи автоматичного керування над існуючими.

Ключові слова: батарея статичних конденсаторів, розподільна електрична мережа, система автоматичного керування

THE SUMMARY

Oliinyk V. S. The optimal system of automatic control of the mode parameters of distribution electric networks under conditions of voltage asymmetry.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2022

The purpose of the work is to reduce the levels of reactive power consumption, as well as to reduce the levels of voltage asymmetry and steady deviation of voltages in distribution electric networks due to the automation of the process of controlling the parameters of the mode of the distribution electric network with the help of symmetrical compensating devices.

The paper analyzed known technical means of reactive power compensation. This analysis showed that the most advanced technical means are batteries of static capacitors with regulation sections, with the help of which it is possible to automatically control the parameters of the mode of the distribution electric network.

The structural diagram of the automatic control system and the algorithm for calculating the optimal control vector, created on the basis of the found solutions of the control problem, made it possible to develop computer models of distribution electric networks with symmetric compensating devices.

The analysis of the effect of using the solution to the problem of controlling the parameters of the mode of distribution electric networks by means of computer simulation proved the advantage of the automatic control system developed in the work over the existing ones.

Keywords: battery of static capacitors, electrical distribution network, automatic control system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	13
1.1 Аналітичний огляд технічних засобів компенсації РП в РЕМ.....	14
1.1.1. Застосування синхронних компенсаторів та синхронних двигунів для компенсації РП в РЕМ	15
1.1.2. Використання статичних тиристорних компенсаторів для компенсації РП в РЕМ	18
1.1.3. Використання БСК для компенсації РП в РЕМ	19
1.2 Мультифункціональний вплив БСК на режим РЕМ	23
1.3 Аналітичний огляд методів автоматизації керування параметрами режиму РЕМ в умовах несиметрії напруг	27
1.4. Вибір напрямку досліджень задачі автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП	35
Висновки до розділу	36
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	38
2.1 Визначення взаємозв'язків між вхідними і вихідними параметрами моделі РЕМ з СКП	38
2.2 Постановка задач автоматичного керування параметрами режиму РЕМ за умов несиметрії напруг	48
2.3 Обґрунтування методу розв'язку задачі керування параметрами режиму РЕМ	51

2.4 Постановка та вирішення задач визначення координат утопічної точки і оптимальних векторів керування	54
Висновки до розділу	58
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	59
3.1 Структурна схема САК параметрами режиму РЕМ і алгоритм розрахунку оптимального вектора керування	60
3.2 Комп'ютерна модель САК параметрами режиму РЕМ	65
3.3 Розрахунок параметрів комп'ютерних моделей РЕМ.....	74
3.4 Комп'ютерне моделювання САК параметрами режиму РЕМ з СКП.....	76
Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	83
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	88
Висновки до розділу	98
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

РП – реактивна потужність

САК – система автоматичного керування

СКП – симетрокомпенсуючий пристрій

БСК – батарея статичних конденсаторів

ПЯЕ – показники якості електричної енергії

РЕМ – розподільна електрична мережа

$\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності

ΔU_1 – усталене відхилення трифазної напруги

U_1 – напруга прямої послідовності

U_0 – напруга нульової послідовності

U_2 – напруга зворотної послідовності

k_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю

k_{0U} – коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю

ВСТУП

Актуальність теми. На теперішньому етапі розвитку розподільних електричних мереж (РЕМ) досить важливим є питання підвищення економічності та ефективності їх роботи. Особливо актуально ця проблема постає для РЕМ номінальною напругою 0,38 – 35 кВ. Це зумовлено тим, що в цих РЕМ, зважаючи на їх досить велику протяжність, рівень втрат електроенергії є порівняно високим. Також зниженню ефективності роботи електричних мереж сприяє понаднормове збільшення значень показників якості електроенергії (ПЯЕ), що зумовлюється наявністю потужних електроспоживачів із несиметричним та різкозмінним графіком електричних навантажень. Одним з найбільш ефективних способів зменшення втрат електроенергії в РЕМ є запровадження заходів з компенсації реактивної потужності.

Найбільш поширеним в електричних мережах технічним засобом компенсації реактивної потужності (КРП) є батареї статичних конденсаторів (БСК). Слід зазначити, що БСК здійснюють мультифункціональний вплив на параметри режиму РЕМ, а саме на рівень усталеного відхилення напруги, на рівні несиметрії напруг, та на значення споживання РП.

Найбільш ефективним є підхід, за якого здійснюється автоматичне керування параметрами режиму мережі (рівнем споживання РП, рівнями несиметрії струмів та напруг). Такий підхід можливо реалізувати з допомогою спеціальних БСК – симетрокомпенсуючих пристроїв (СКП). Конструкція СКП передбачає наявність не лише симетричної частини, що призначена для компенсації РП, але і несиметричної, яка призначена для симетрування напруг та струмів в РЕМ. Симетрування напруг і струмів з допомогою СКП здійснюється шляхом пофазної зміни ємнісних опорів. Зазначені СКП набули широкого розповсюдження в РЕМ за рахунок їх високої ефективності і порівняно низької вартості.

На тепер розроблено досить значну кількість методів автоматичного

керування СКП а також технічних засобів, які їх реалізують. Досить широке розповсюдження отримали системи автоматичного керування (САК), що які виконують функцію стабілізації заданого рівня споживання РП та рівні несиметрії напруг в РЕМ.

Але, зважаючи на мультифункціональність впливу СКП не тільки на рівень споживання РП та рівні несиметрії напруг, але і на значення усталеного відхилення напруги в РЕМ, за певних обставин в мережі можуть виникнути випадки, коли при підключенні СКП буде спостерігатись збільшення значення усталеного відхилення напруг понад нормально допустиме значення. Це призводить до додаткових збитків від погіршення якості електроенергії, і, як наслідок, до зниження ефективності роботи РЕМ в цілому.

Зважаючи на вище сказане задача розробки САК режимами РЕМ, які б в якомога повній мірі враховували мультифункціональний вплив СКП не тільки на рівні споживання РП та на рівні несиметрії напруг, а й на значення усталеного відхилення напруг в електричній мережі є актуальною.

Мета і задачі роботи. Метою даного дослідження є зниження рівнів споживання РП, а також зниження рівнів несиметрії напруг та усталеного відхилення напруг в РЕМ за рахунок автоматизації процесу керування параметрами режиму РЕМ з допомогою СКП.

Досягнення цієї мети дослідження реалізується через розв'язання таких задач:

1. Провести аналіз існуючих технічних засобів і методів компенсації РП та симетрування напруг в РЕМ, та існуючих методів їх автоматизації з метою визначення їх недоліків.

2. Формалізувати задачі керування параметрами режиму РЕМ з СКП для забезпечення одночасного зниження споживання РП, рівнів несиметрії а також усталеного відхилення напруг, та здійснити обґрунтування методу розв'язання описаних задач.

3. Розробити структурні схеми оптимальних САК параметрами режиму РЕМ з СКП.

4. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК параметрами режиму РЕМ з СКП.

5. Провести аналіз ефекту від використання розв'язків задач оптимального керування параметрами режиму РЕМ з СКП шляхом застосування методу комп'ютерного моделювання розроблених САК.

Об'єкт дослідження – процес оптимального керування параметрами режиму РЕМ.

Предмет дослідження – оптимальні САК параметрами режиму РЕМ з СКП в умовах несиметрії напруг РЕМ.

Методи досліджень. Вирішення задач дослідження відбувалося за допомогою методів комп'ютерного моделювання, скалярної та багатокритеріальної оптимізації, теорії електромагнітних кіл, чисельних методів розв'язку задач, теорії автоматичного керування.

Основні наукові результати роботи полягають в наступному:

1. Обґрунтовано використання методу розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом використання методу наближення до утопічної точки в критеріальному просторі для знаходження правил автоматичної пофазної зміни ємнісних опорів СКП.

2. Отримано розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації, застосування яких дає змогу досягти одночасного зменшення рівнів споживання РП, несиметрії і усталеного відхилення напруг у РЕМ.

3. Розроблено комп'ютерні моделі САК параметрами режиму РЕМ з СКП, що дозволяють проводити аналіз параметрів режиму РЕМ в умовах несиметрії напруг.

Основні практичні результати роботи:

- розроблено алгоритми визначення вектора керування СКП, якою працює в умовах несиметрії напруг мережі;

- розроблено комп'ютерні моделі САК параметрами режиму РЕМ з СКП для розподільних мереж з ізольованою нейтраллю.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 105 сторінок. Основна частина викладена на 92 сторінках друкованого тексту, містить 35 рисунків та 5 таблиць. Список використаних джерел містить 45 джерел та викладений на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Для РП загальноприйнятими є поняття споживання РП, генерації РП, передачі РП і втрат РП. Вважається, що якщо струм відстає за фазою від напруги (індуктивне навантаження), то РП споживається, а якщо струм випереджає напругу за фазою (ємнісне навантаження), то РП генерується. Існують значні відмінності між РП і активною потужністю з точки зору їх генерації і споживання. Якщо значну частину активної потужності споживають електроприймачі, і лише незначна її частка втрачається в елементах РЕМ, то втрати РП в елементах РЕМ можуть бути співрозмірні РП, яка споживається електроприймачами.

Джерелами РП є генератори електростанцій, синхронні двигуни, повітряні лінії, кабельні лінії та компенсуючі пристрої.

Генерація значної кількості РП генераторами електростанцій в більшості випадків є економічно недоцільною по наступним таким причинам.

1. При передачі активної потужності P та РП Q через елемент РЕМ з активним опором R , втрати активної потужності будуть рівними:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta Q_p. \quad (1.1)$$

Як видно з формули (1.1), залежність додаткових втрат активної потужності ΔP_a , спричинених протіканням РП по елементах РЕМ від значення цієї потужності носить нелінійний, а саме квадратичний характер. Суттєві втрати активної потужності в елементах РЕМ вимагають

наближувати джерела РП до місця її споживання, а також та зменшувати її передавання від генераторів.

2. Виникнення додаткових втрат напруги. При передачі активної потужності та РП через елемент РЕМ втрати напруги складатимуть:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p, \quad (1.2)$$

де ΔU_a , ΔU_p – втрати напруги, що зумовлені відповідно активною потужністю та РП.

В наслідок цього, передача значної кількості РП по елементам системи, не може бути здійснена у зв'язку із понаднормовими спадами напруги.

3. Завантаження РП елементів систем промислового електропостачання (силових трансформаторів, повітряних та кабельних ліній) зменшує їх пропускну здатність, та вимагає збільшення перерізу ліній електропередачі, збільшення кількості та (або) номінальної потужності силових трансформаторів на знижувальних підстанціях та ін..

Значного економічного ефекту досягають при грамотному поєднанні різноманітних заходів з компенсації РП, які повинні бути економічно та технічно обґрунтовані. Загальноприйнятим критерієм економічності є показник мінімуму приведених затрат [2].

Проведемо огляд основних технічних засобів компенсації РП, що застосовуються в РЕМ напругою 0,38 – 10 кВ.

1.1 Аналітичний огляд технічних засобів компенсації РП в РЕМ

Основними технічними засобами, призначеними для компенсації РП в РЕМ є [3]:

– синхронні компенсатори;

- синхронні двигуни (СД);
- батареї статичних конденсаторів (БСК).
- статичні тиристорні компенсатори;

На рисунку 1.1. наведена класифікація технічних засобів компенсації РП в РЕМ.

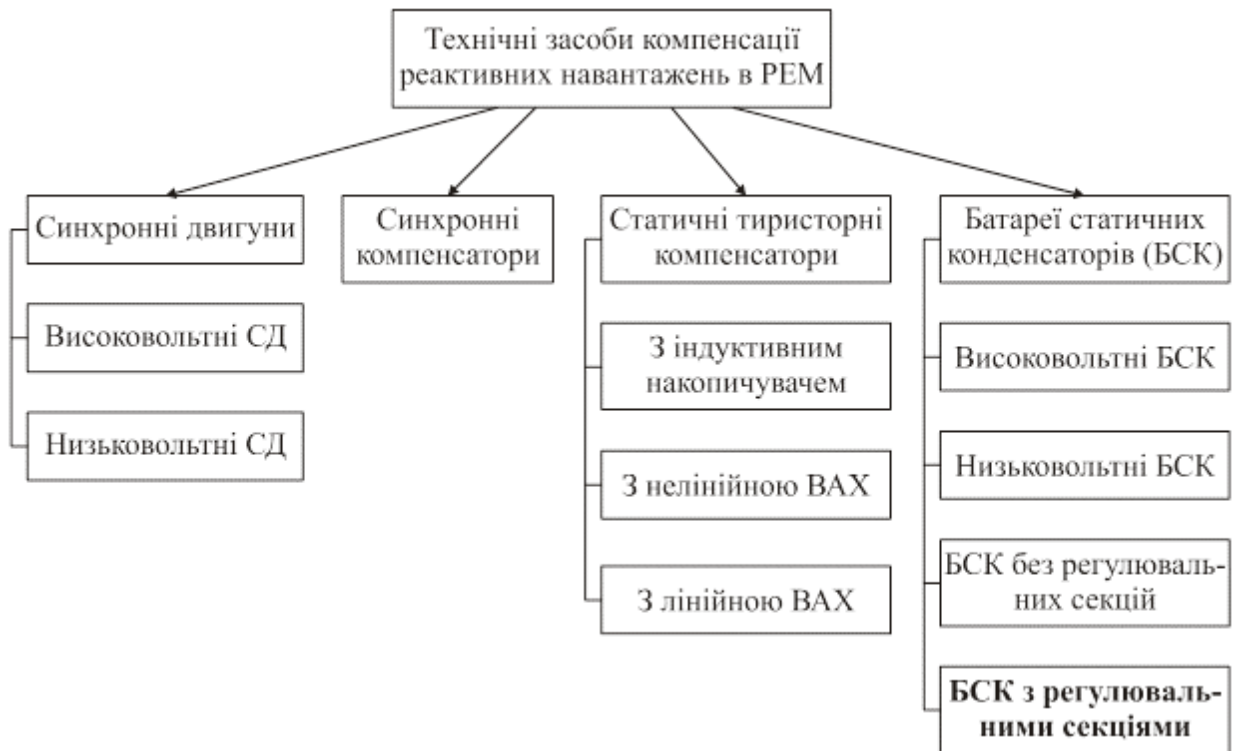


Рис. 1.1. Класифікація засобів компенсації РП в РЕМ

Розглянемо більш детально перераховані технічні засоби компенсації РП.

1.1.1. Застосування синхронних компенсаторів та синхронних двигунів для компенсації РП в РЕМ. СД можуть використовуватись в РЕМ не тільки як частина електроприводу, але і як джерело РП.

Характер і значення РП синхронного двигуна визначається значенням струму збудження. На рис. 1.2 приведено сімейство U -подібних характеристик СД, які являють собою функціональні залежності величини струму статора

від величини струму збудження СД при постійному значенні споживаної активної потужності.

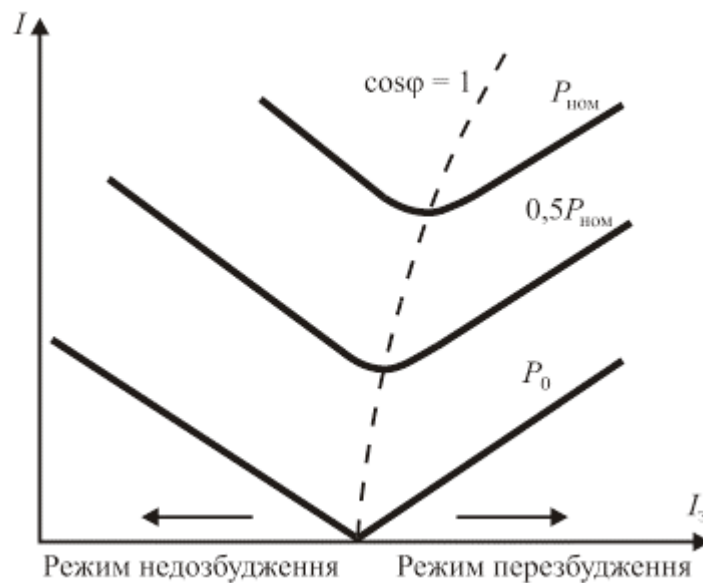


Рис. 1.2. U -подібні характеристики СД

На рис. 1.2 ліві гілки характеристик відповідають режиму недозбудження СД, в якому він являє собою RL навантаження, тобто споживає РП з мережі ($\cos\varphi < 1$). Праві частини U -подібних характеристик характеризують режиму перезбудження СД, за якого він може бути представлений у вигляді активно-ємнісного навантаження ($\cos\varphi > 1$). В такому режимі СД генерує РП.

Компенсуюча здатність СД характеризується відношенням РП, яка віддається СД в мережу, до значення повної потужності двигуна.

Основною перевагою використання синхронних двигунів для компенсації РП є його здатність до генерації РП в режимі перезбудження. Такий спосіб компенсації РП, в порівнянні з іншими, не вимагає додаткових капіталовкладень в РЕМ.

Недоліками використання СД для компенсації РП є [3]:

– необхідність неповного завантаження СД, так як збільшення компенсуючої здатності СД спостерігається при меншому значенні коефіцієнта завантаження СД по активній потужності. Зважаючи на це, доцільність цього способу компенсації РП повинна бути доведена техніко-економічними розрахунками;

– досить високі (в порівнянні з БСК) питомі втрати активної потужності на одиницю РП, що генерується СД.

Окрім цього використання СД лише для компенсації РП є економічно недоцільним через їх досить високу вартість.

На відміну від СД, синхронні компенсатори – це спеціальні синхронні машини, які призначені лише для генерації і споживання РП. Так як вони працюють лише в режимі холостого ходу (без навантаження на валу), то їх конструкція полегшена у порівнянні з СД.

Режим роботи синхронного компенсатора визначається значенням струму збудження. Робота синхронного компенсатора в режимі недозбудження допускається для зниження усталеного відхилення напруги в РЕМ. В режимі перезбудження синхронний компенсатор виробляє РП в мережу.

Головною перевагою синхронного компенсатора в порівнянні з СД є значно вище значення питомої РП. Це пов'язано із використанням більш досконалих систем охолодження за рахунок герметичного виконання корпусу. За такого підходу стає можливим збільшення навантажувальної здатності синхронного компенсатора в порівнянні з СД.

До основних недоліків синхронних компенсаторів відносяться [3]:

– великі втрати активної потужності (можуть складати 1...3 кВт на 100 квар РП);

– питомі затрати на монтаж та експлуатацію синхронних компенсаторів значно (в декілька разів) більші в порівнянні з такими ж для БСК;

– висока вартість.

Описані недоліки синхронних компенсаторів зумовили те, що вони не знайшли досить широкого розповсюдження в РЕМ. Область їх застосування обмежується потужними підстанціями енергосистеми.

1.1.2. Використання статичних тиристорних компенсаторів для компенсації РП в РЕМ. Статичний тиристорний компенсатор являє собою комбіновану електроустановку, яка складається з тиристорно-реакторних груп, фільтро-компенсуючих або конденсаторних установок і системи автоматичного керування [3,4].

Ці пристрої є мультифункціональними, з їх допомогою можна вирішувати задачі компенсації РП та підтримання нормально допустимих рівнів показників якості електроенергії (ПЯЕ).

найбільш поширені схеми статичних тиристорних компенсаторів показані на рис. 1.3

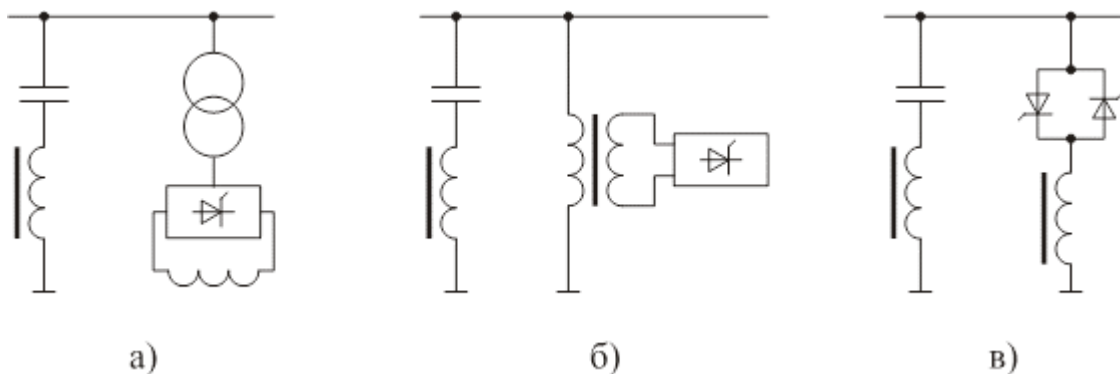


Рис. 1.3. Схеми статичних тиристорних компенсаторів

Наведені на рис. 1.3 схеми містять фільтри вищих гармонік та регулюючий дросель. В наш час відома велика кількість варіантів схем, які можна поділити на три групи:

- мостові джерела РП з індуктивним накопичувачем зі сторони пост. струму (рис.1.3 а);
- нелінійні реактори насичення (рис.1.3 б);

– лінійні реактори з послідовно з'єднаними зустрічно-паралельними напівпровідниковими ключами (рис.1.3 в).

Основні переваги описаних пристроїв – це висока швидкодія, порівняно малі втрати активної потужності, висока надійність.

Основними недоліками тиристорних компенсаторів є висока вартість та спричинення зниження якості електроенергії по показникам, що характеризують несинусоїдальність напруги. Тому тиристорні компенсатори не знайшли значного розповсюдження в РЕМ. Область їх використання обмежується лише промисловими підприємствами що мають різкозмінне електричне навантаження.

1.1.3. Використання БСК для компенсації РП в РЕМ. Найбільш поширеним в РЕМ засобом компенсації РП є БСК. Основною частиною БСК є конденсатори, які генерують РП в мережу.

Сучасні БСК виготовляються в однофазному та трифазному виконанні, та мають вбудовані розрядні опори і захисти від перенапруг, що зумовлює їх високу надійність. Номінальні значення потужностей БСК лежать в досить широкому діапазоні: напругою 0,38 кВ від 2,5 квар та напругою 10 кВ від 15 квар. Застосування сучасних матеріалів під час виготовлення БСК дає змогу значного зменшити їх габаритні розміри.

Значення РП, що генерується в РЕМ з допомогою БСК носить дискретний характер: регулювання РП БСК відбувається зміною кількості секцій, приєднаних до РЕМ. Із збільшенням кількості секцій послаблюється вплив дискретності БСК на якість автоматичного керування режимами РП.

В процесі вибору типу, місця встановлення, потужності і способу керування БСК з метою досягнення максимального позитивного ефекту необхідно враховувати наступні міркування:

- максимальний економічний ефект досягається при наближенні БСК до електроприймача;

- БСК можна встановлювати поблизу одиничного навантаження із коефіцієнтом використання близьким до одиниці;

– індивідуальна компенсація РП найбільш ефективна для потужних електроприймачів, проте повинна передбачати можливість ввімкнення та вимкнення БСК одночасно із ввімкненням та вимкненням електроприймача.

В роботах [24, 25] зазначається, що економічно доцільним варіантом компенсації РП є варіант, який забезпечує мінімум приведених затрат, що містять затрати на придбання та монтаж БСК і затрати, зумовлені генерацією та розподілом РП.

На змінні керування функції приведених затрат накладаються такі технічні і режимні обмеження:

1. Умова балансу РП:

$$Q_{\text{сум}} - Q_{\text{н.сум}} - \Delta Q_{\text{сум}} + Q_{\text{ел}} = 0, \quad (1.3)$$

де $Q_{\text{сум}}$ – значення сумарної РП БСК;

$Q_{\text{н.сум}}$ – значення сумарного реактивного навантаження;

$\Delta Q_{\text{сум}}$ – сумарні втрати РП;

$Q_{\text{ел}}$ – вхідна РП.

2. Допустимий режим БСК:

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}, \quad (1.4)$$

де $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ – відповідно мінімальне та максимальне значення РП споживання чи генерації відповідно;

3. Значення напруги на затискачах електроприймачів:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}, \quad (1.5)$$

де $U_{\min}$, $U_{\max}$ – значення рівнів напруги, що відповідають мінімально та максимально допустимому значенню усталеного відхилення напруги.

В залежності від виду електричного навантаження, його потужності і якісного складу електроприймачів розрізняють наступні способи розташування БСК відносно електроприймачів в РЕМ (рис. 1.4):

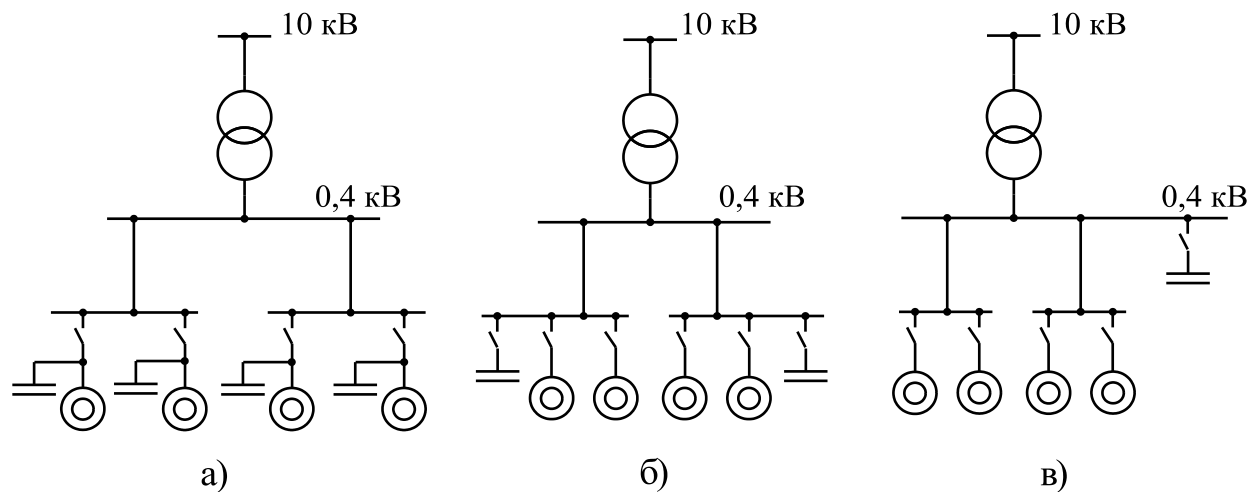


Рис. 1.4. Схеми приєднання БСК:

а) індивідуальна компенсація РП

б) групова компенсація РП

в) загальна (централізована) компенсація РП

Проаналізуємо більш детально кожен з описаних способів розташування БСК в РЕМ.

1. *Індивідуальна компенсація РП* (рис. 1.4 а) – це спосіб розташування БСК, при якому їх приєднують безпосередньо біля приймачів. В цьому випадку вимикач електроприймача забезпечує і комутацію БСК. Цей спосіб компенсації РП використовується у випадку одиничних тривало приєднаних потужностей вище 20 кВт. Основним недоліком цього способу розташування БСК є значні капіталовкладення.

Індивідуальна компенсація – це одне з найпростіших технічних рішень. Потужність БСК обирається за значенням потужності і $\cos\varphi$ електродвигуна, тому споживана двигуном РП компенсується постійно, а значення $\cos\varphi$ є достатньо високим. Ще однією перевагою такого підходу до компенсації РП є порівняно невеликі експлуатаційні витрати.

Індивідуальна компенсація найбільш ефективна у випадку, коли значна частина РП споживається невеликою кількістю електроприймачів досить тривалий період.

2. *Групової компенсації РП* (рис. 1.4 б) забезпечує компенсацію РП, що споживається декількома активно-індуктивними навантаженнями, що приєднані до одного і того ж розподільчого пристрою з БСК. Збільшення значення коефіцієнта одночасності ввімкнення електричного навантаження знижує значення споживаної РП і, як наслідок, підвищує ефективність БСК, яка може бути встановлена на стороні 0,38 кВ або на стороні 10 кВ. Основними недоліками такого способу компенсації РП є індивідуальна комутація кожної з БСК і неповне розвантаження РЕМ підприємства від РП.

3. *Централізована компенсація РП* (рис. 1.4 в) виконується за допомогою однієї чи декількох БСК, що приєднані до шин ВН або НН трансформаторної підстанції чи головного розподільчого пристрою. Централізована компенсація РП вимагає менших капітальних витрат, але не забезпечує розвантаження цехових кабельних ліній і кабельних окремих електроприймачів.

Характер зміни навантаження в часі є основним чинником, який впливає на вибір способу компенсації РП. На багатьох промислових підприємствах не все обладнання працює одночасно, чимало верстатів ввімкнені лише декілька годин на добу. Тому індивідуальна компенсація РП стає дуже вартісним технічним рішенням за наявності великої кількості обладнання. За такого підходу значна частина потужностей БСК буде мати низьке значення коефіцієнту використання.

Централізована компенсація використовується там, де навантаження, і споживання РП змінюється з часом.

За такого випадку більш доцільним є використання керованих БСК, зміна генерованої РП яких відбувається з шляхом автоматичного регулювання за одним із законів керування РП.

Дослідження, що проведені в роботі, стосуються варіантів групової та централізованої компенсації РП як таких, що набули найбільшого розповсюдження в РЕМ напругою 0,38 – 10 кВ.

БСК мають цілий ряд переваг перед іншими типами компенсуючи пристроїв, основні з яких полягають в наступному:

- порівняно низькі питомі втрати активної потужності (5 Вт на 1 квар);
- простий процес монтажу і експлуатації;
- відсутність частин, що обертаються;
- невисокі капіталовкладення експлуатаційні затрати;
- широкий діапазон регулювання.

До головних недоліків БСК слід віднести значну залежність генерованої ними РП від значення напруги; чутливість до спотворення форми напруги живлення.

Але, незважаючи на описані недоліки, саме БСК знайшли найбільшого поширення в РЕМ як найефективніший засіб компенсації РП. До того ж, БСК здійснюють мультифункціональний вплив на параметри режиму РЕМ.

1.2 Мультифункціональний вплив БСК на режим РЕМ

Я зазначалось вище, БСК – це мультифункціональні пристрої, використання яких спричиняє наступні ефекти:

1. Зниження втрат активної потужності, що виникають у опорах елементів РЕМ внаслідок завантаження їх РП.

2. Створення добавки напруги під час увімкнення БСК, що здійснює вплив на рівні усталеного відхилення напруги.

3. Зменшення розмаху коливання напруги за рахунок зменшення розмаху коливання реактивного навантаження, що спостерігається при застосуванні швидкодіючих БСК. Ефективність такого способу залежить від швидкодії САК БСК. Найбільш ефективними в цьому плані є БСК повздовжнього увімкнення.

4. Зниження рівня несиметрії напруг за рахунок застосування спеціальних симетруючих пристроїв, побудованих на основі БСК – симетрокомпенсувальних пристроїв.

Зазначені властивості БСК використовуються за деяких умов їх експлуатації – у випадках, коли параметри режиму РЕМ набувають значень, що наближаються до гранично допустимих значень, визначених нормативною документацією. Питання впливу БСК на значення параметрів режиму РЕМ за умов їх суттєвого відхилення від номінальних значень досліджувалося в роботах [16, 18]. Приведемо основні результати, які отримані для батарей симетричного виконання за умов наявності несиметрії напруг в РЕМ:

1. Додаткові втрати ΔP_2 в БСК:

$$\Delta P_2 = Q_{\text{н}} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot k_{2U}^2, \quad (1.6)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – коефіцієнт, що характеризує діелектричні втрати потужності на основній частоті;

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

Проведені в роботі [16] розрахунки показали, що додаткові втрати активної потужності в БСК є несуттєвими: при значенні коефіцієнту $k_{2U} = 10\%$ ці втрати становлять менше 0,01% від загальних втрат потужності.

2. Конденсаторні батареї в окремих фазах при $k_{2U} \neq 0$ знаходяться під різною напругою, що може спричинити як їх перевантаження, так і

недовантаження. Для цього випадку потужність БСК визначається за формулою [18, 32]:

$$Q = Q_{\text{н}} \left(\frac{U_1}{U_{\text{ном}}} \right)^2 (1 + k_{2U}^2), \quad (1.7)$$

де U_1 – значення напруги прямої послідовності;

$U_{\text{ном}}$ – значення номінальної напруги БСК.

3. Додатковий нагрів ізоляції батарей в фазах із підвищеним значенням напруги визначається за формулою [19]:

$$\Delta \tau_{\phi} = \tau_{\text{н}} \left[k_{2U}^2 + 2k_{2U} \cos[f(\psi_2)] \right], \quad (1.8)$$

де $\tau_{\text{н}}$ – значення температури нагріву ізоляції БСК у випадку симетричної напруги;

ψ_2 – кут між складовими прямої та зворотної послідовностей лінійних напруг;

4. Підвищена напруга на БСК призводить до посилення іонізаційних процесів в їх ізоляції, що суттєво позначається на термінах її експлуатації. Зменшення терміну служби ізоляції внаслідок підсилення іонізаційних процесів при несиметрії напруги на БСК описується наступною формулою [19]:

$$\Delta t_U = \frac{2 \left[k_{2U}^2 + 2k_{2U} \cos f(\psi_2) \right]}{1 + \frac{\pi}{2} k_{\text{п.і.}}}, \quad (1.9)$$

де $k_{п.і.} = 0,15 - 0,2$ – коефіцієнт, що характеризує відношення номінального значення напруги БСК до значення напруги початку іонізації.

При значенні $k_{2U} = 2\%$ термін служби ізоляції БСК зменшується на 20 ...25%.

В роботі [8] зазначається, що ввімкнення БСК при несиметрії напруг приводить до збільшення напруги зворотної послідовності. Пропонується розв'язувати дану задачу в два кроки. На першому етапі розв'язується задача компенсації РП незважаючи на наявну несиметрію напруг. На другому кроці у вузлах, де несиметрія напруг вийде за межі допустимого значення вирішується задача синтезу компенсуючого пристрою несиметричного виконання номінальною потужністю, що визначена на першому кроці розрахунку, який одночасно знизить несиметрію напруг до допустимих меж.

В роботі [17] проведено аналіз умов компенсації РП симетричних навантажень при частковому їх симетруванні. Зазначено, що приєднання БСК впливає на характер та величину опору мережі. Компенсація РП симетричними БСК збільшує рівень несиметрії напруг через зміну опору зворотної послідовності електричної мережі (сумарний опір зворотної послідовності зростає, збільшується і значення напруги зворотної послідовності). Автори приходять до висновку, що компенсацію РП в мережах із несиметричними електричними навантаженнями доцільно виконувати шляхом використання несиметрично ввімкнених БСК, чи двоелементних симетрувальних пристроїв.

Отже, БСК симетричного виконання здійснюють мультифункціональний вплив на режими роботи мережі, а саме на споживання РП, рівень усталеного відхилення та рівні несиметрії напруг.

Реалізовані на базі БСК СКП дають змогу здійснювати керований вплив на несиметрію напруг в більш широкому інтервалі, в порівнянні з симетричними батареями конденсаторів, за рахунок можливості пофазної зміни їх опорів. Зважаючи на сучасний рівень розвитку енергетичної галузі

та галузі приладобудування вартість таких СКП не досить суттєво відрізняється від вартості БСК симетричного виконання.

Як зазначалось вище, БСК, які оснащені автоматичними регуляторами РП, мають ряд переваг над нерегульованими БСК. Розвиток мікроелектроніки спричинив значне зменшення вартості таких регуляторів, в зв'язку з чим головною складовою вартості регульованої БСК є вартість конденсаторів, а не самого регулятора. Тому різниця між значеннями вартості БСК з автоматичними регуляторами та БСК без них є порівняно невисокою, до того ж спостерігаються тенденції до подальшого її зменшення в майбутньому.

Отже, застосування СКП з автоматичними регуляторами РП є одним із найбільш перспективних шляхів підвищення економічності роботи мереж номінальною напругою 0,38 – 10 кВ.

Загальновідомо, що удосконалення САК є досить ефективним та найменш капіталоемним методом підвищення ефективності автоматизованого електрообладнання. Регульовані БСК і розроблені на їх основі СКП не являються винятком. В зв'язку з цим, необхідно провести аналіз відомих методів та засобів автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з допомогою СКП щоб виявити їх основні недоліки.

1.3 Аналітичний огляд методів автоматизації керування параметрами режиму РЕМ в умовах несиметрії напруг

Як зазначалось вище, з допомогою СКП можливо спільно вирішувати задачі симетрування напруг (струмів) та компенсації РП. В залежності від режиму нейтралі РЕМ будуть різнитись симетричні складові цих параметрів режиму. У випадку мережі з ізольованою нейтраллю характерною є присутність складових прямої і зворотної послідовностей; для РЕМ з глухозаземленою нейтраллю характерною є наявність симетричних складових окрім прямої і зворотної ще й нульової послідовностей.

Структурна схема СКП для трифазної РЕМ (трьох провідне виконання) приведена на рисунку 1.5.

На рис. 1.5:

«НАВАНТАЖЕННЯ» – трифазне навантаження (несиметричне);

«ДЖЕРЕЛО» – трифазне джерело живлення;

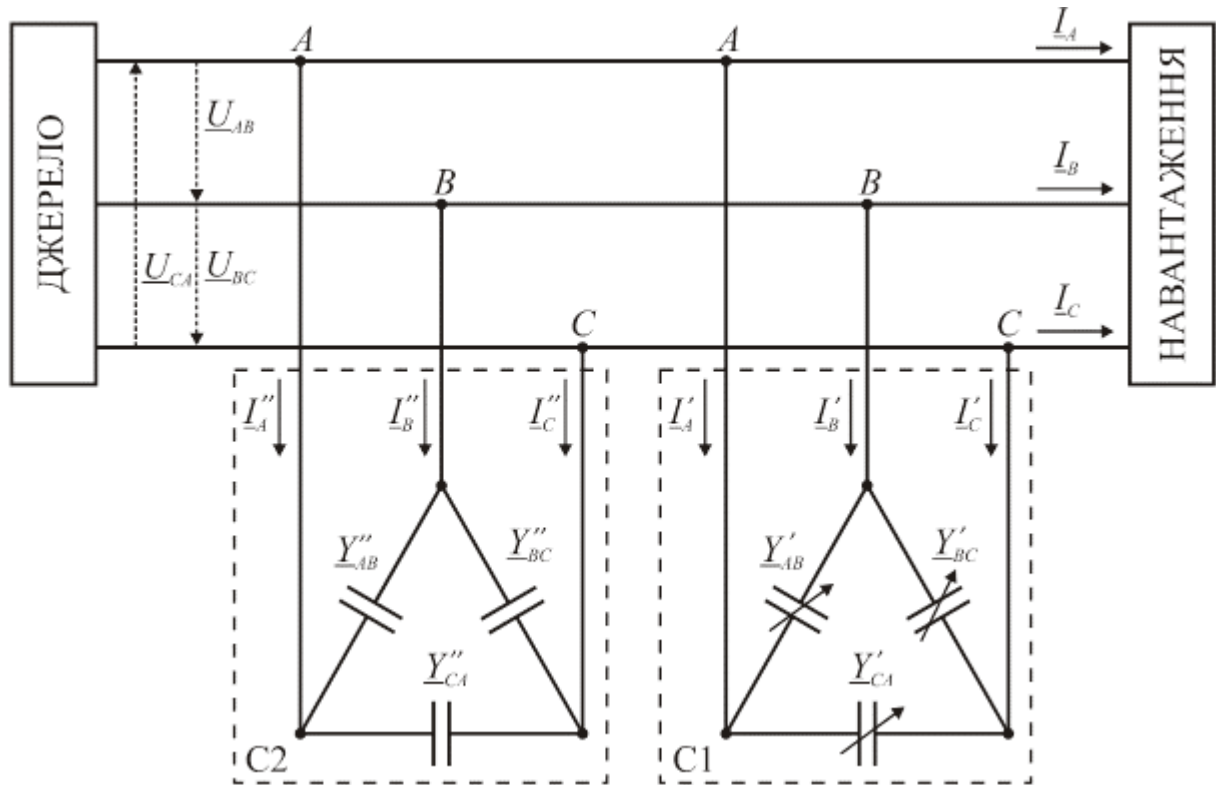


Рис. 1.5. Структурна схема СКП для трьохпровідної мережі

C1 – регульовальна (несиметрична) частина СКП;

C2 – нерегульована (симетрична) частина СКП;

U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – міжфазні напруги джерела живлення;

Y'_{AB} , Y'_{BC} , Y'_{CA} – ємністі провідності фаз регульованої частини СКП;

I'_A , I'_B , I'_C – фазні струми регульованої частини СКП;

Y''_{AB} , Y''_{BC} , Y''_{CA} – ємнісні провідності фаз нерегульованої частини СКП;

I''_A , I''_B , I''_C – фазні струми симетричної частини СКП;

I_A , I_B , I_C – фазні струми навантаження.

Структурна схема СКП для трифазної мережі (чотирьох провідне виконання) приведена на рисунку 1.6.

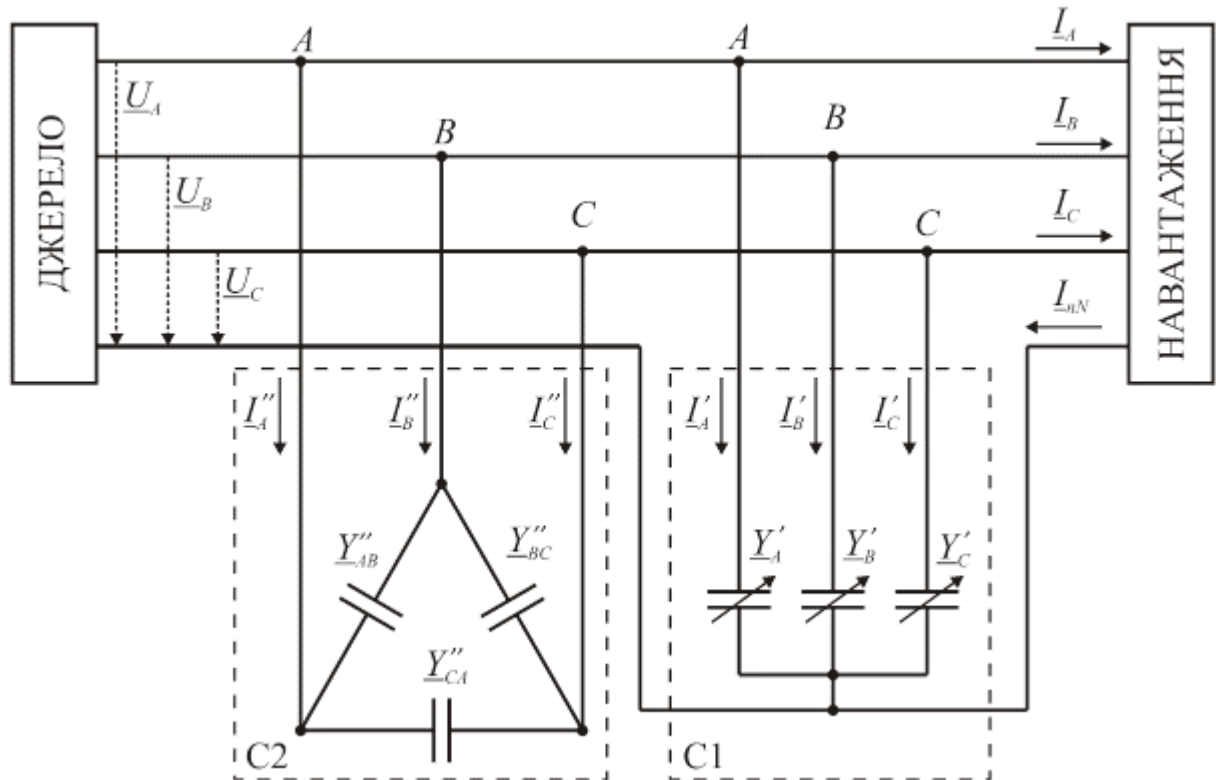


Рис. 1.6. Структурна схема СКП для чотирьохпровідної мережі

На рис. 1.6:

$\underline{Y}_A', \underline{Y}_B', \underline{Y}_C'$ – ємнісні провідності фаз регульованої частини СКП;

U_A, U_B, U_C – фазні напруги джерела живлення;

$\underline{I}_A', \underline{I}_B', \underline{I}_C'$ – фазні струми регульованої частини СКП;

$\underline{Y}_{AB}'', \underline{Y}_{BC}'', \underline{Y}_{CA}''$ – ємнісні провідності фаз нерегульованої частини СКП;

$\underline{I}_A'', \underline{I}_B'', \underline{I}_C''$ – фазні струми симетричної частини СКП;

$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C, \underline{I}_C$ – фазні струми навантаження в нульовому провіднику.

Як показано на рис. 1.5 і 1.6 СКП складається з 2-х частин: симетричної та несиметричної. Симетрична частина призначена для компенсації РП, а несиметрична – для симетрування напруг (струмів).

В залежності від вибору інформаційних параметрів САК СКП будуть різнитись закони автоматичного керування і структура САК. В якості інформаційних параметрів САК СКП можуть бути такі:

- потужності і провідності фаз навантаження;
- напруги і струми фаз навантаження.

Проаналізуємо більш детально САК СКП для зазначених випадків.

Алгоритм автоматичного керування СКП, що забезпечує симетрування напруг зворотної послідовності та наперед задане значення $\cos\varphi$ для трьохфазної трьохпровідної РЕМ, який використовує в якості інформаційних параметрів потужності фаз навантаження і провідності можна описати наступним чином [33]:

$$\begin{cases} b_{AB} = \Delta b_{AB} + b_0' = -\frac{1}{3U^2} \left[\frac{Q}{3} + \frac{2}{\sqrt{3}}(P_A - P_B) \right]; \\ b_{BC} = \Delta b_{BC} + b_0' = -\frac{1}{3U^2} \left[\frac{Q}{3} + \frac{2}{\sqrt{3}}(P_B - P_C) \right]; \\ b_{CA} = \Delta b_{CA} + b_0'' = -\frac{1}{3U^2} \left[\frac{Q}{3} + \frac{2}{\sqrt{3}}(P_C - P_A) \right], \end{cases} \quad (1.10)$$

де b_{AB}, b_{BC}, b_{CA} – ємнісні провідності регульованої частини СКП;

$\Delta b_{AB}, \Delta b_{BC}, \Delta b_{CA}$ – приріст ємнісних провідностей нерегульованої частини СКП;

b_0'' – ємнісна провідність нульової послідовності нерегульованої частини СКП;

U – значення напруги в точці приєднання СКП до РЕМ;

P_A, P_B, P_C – значення потужностей навантаження для фаз А, В, С;

Q – сумарна трифазна реактивна потужність.

Узагальнена структурна схема автоматичного СКП, який реалізує алгоритм керування (1.10) показана на рисунку 1.7.

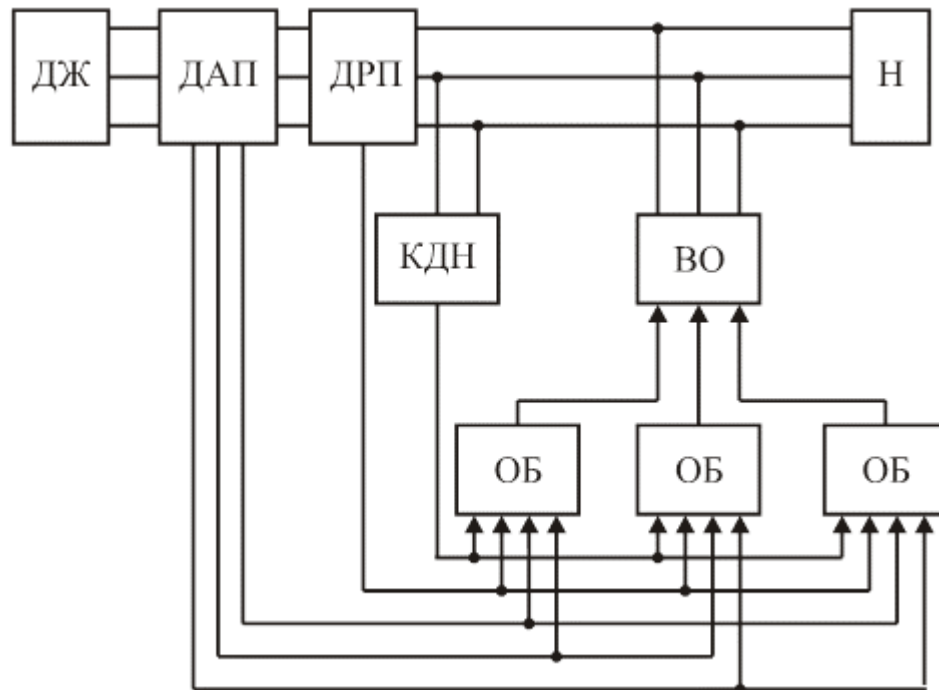


Рис. 1.7. Узагальнена структурна схема автоматичного СКП, який реалізує алгоритм автоматичного керування (1.10)

На рисунку 1.7:

Н – несиметричне трифазне навантаження;

ДЖ – трифазне джерело живлення;

ДАП – давач активної потужності фаз;

ВО – виконавчий орган;

КДН – квадратичний давач напруги;

ДРП – давач значення РП;

ОБ – операційний блок.

СКП, узагальнена структурна схема якого показана на рисунку 1.7, працює таким чином. Значення лінійних напруг поступають на давачі КДН,

ДРП, ДАП,. На виході кожного з цих трьох давачів ДАП формується сигнал, пропорційний активній потужності фази. Давачем ДРП сумарна РП перетворюється в сигнал того ж типу, а вихідний сигнал КДН пропорційний квадрату діючої фазної або лінійної напруги. Операційні блоки ОБ в залежності від сигналів, які надійшли з датчиків КДН, ДРП, ДАП, і проводиться розрахунок приростів параметрів ємнісних елементів СКП і формування керуючих сигналів на ємнісні елементи виконавчого органу ВО. Як слідує із (1.10), керувальні впливи однозначно визначають величину і знак приросту.

Алгоритм (1.10) після деяких перетворень, що описані в роботі [33], може бути використаний для синтезу САК СКП для трифазної чотирипровідної мережі.

Алгоритм автоматичного керування СКП, що забезпечує симетрування напруг зворотної послідовності та наперед задане значення $\cos\varphi$ для трьохфазної трьохпровідної РЕМ, який використовує в якості інформаційних параметрів напруги і струми фаз навантаження, можна описати наступним чином [33]:

$$\begin{cases} b_{AB} = \frac{1}{3U} [I_A \cos(\psi_{Uca} - \psi_{Ia}) + I_B \cos(\psi_{Ubc} - \psi_{Ib})]; \\ b_{BC} = \frac{1}{3U} [I_B \cos(\psi_{Uab} - \psi_{Ib}) + I_C \cos(\psi_{Uca} - \psi_{Ic})]; \\ b_{CA} = \frac{1}{3U} [I_C \cos(\psi_{Ubc} - \psi_{Ic}) + I_A \cos(\psi_{Uab} - \psi_{Ia})], \end{cases} \quad (1.11)$$

Узагальнена структурна схема автоматичного СКП, який реалізує алгоритм керування (1.11) приведена на рисунку 1.8.

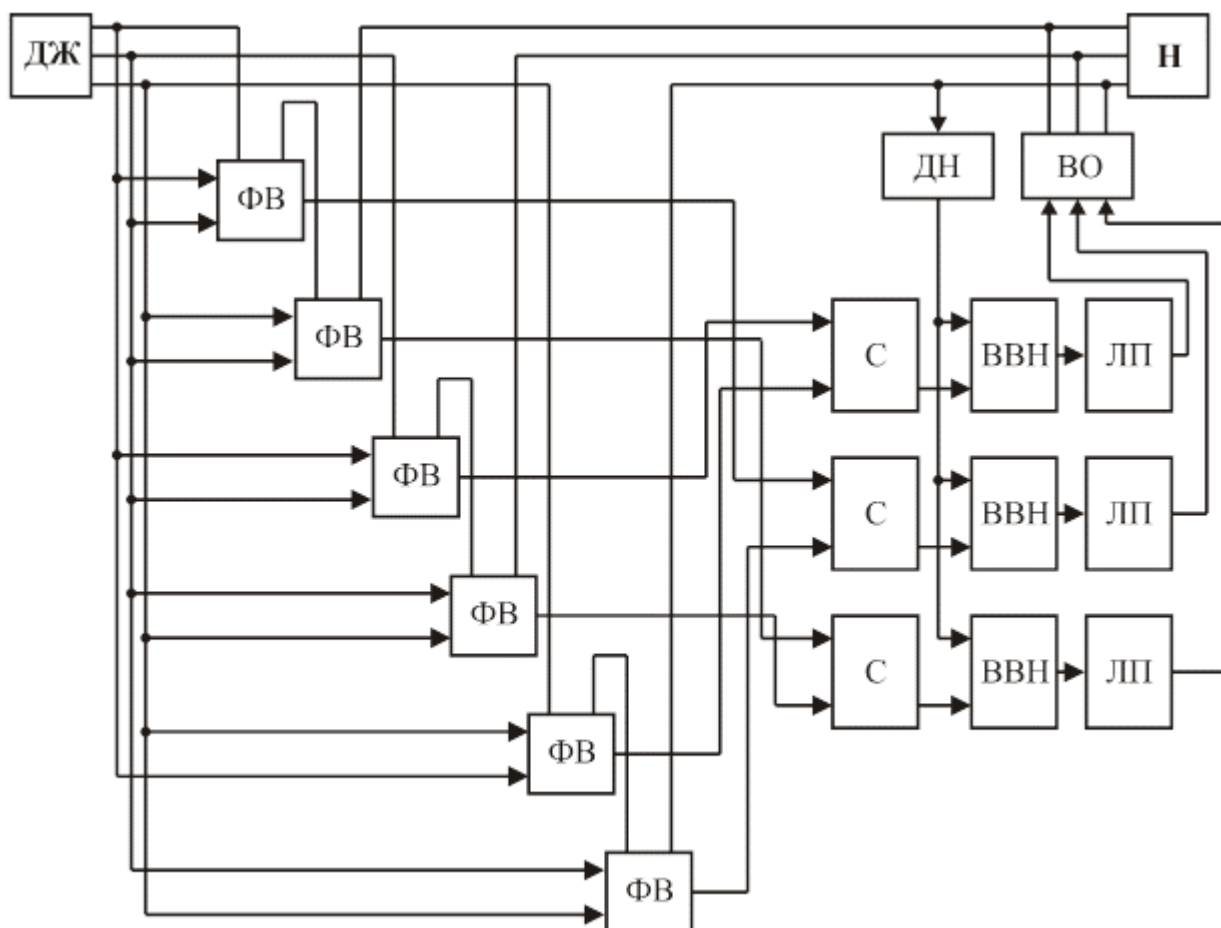


Рис. 1.8. Узагальнена структурна схема автоматичного СКП, який реалізує алгоритм керування (1.11)

На рисунку 1.8:

- Н – несиметричне трифазне навантаження;
- ДЖ – трифазне джерело живлення;
- ДН – датчик діючого значення напруги;
- ФВ – фазочутливий випрямляч;
- БР – блок різниць;
- ВВН – вимірювач відношення двох напруг;
- С – суматор;
- ЛП – лінійний підсилювач;
- ОБ – операційний блок;
- ВО – виконавчий орган.

СКП, узагальнена структурна схема якого приведена на рисунку 1.8, працює наступним чином. На фазочутливі випрямлячі ФВ подається одна із можливих шести комбінацій фазних струмів і лінійних напруг, а на їх виводах формуються постійні напруги, що пропорційні відповідним величинам:

$$\begin{cases} U_{\Phi B1} = I_A \cos(\psi_{Uab} - \psi_{Ia}); & U_{\Phi B2} = I_A \cos(\psi_{Uca} - \psi_{Ia}); \\ U_{\Phi B3} = I_B \cos(\psi_{Uab} - \psi_{Ib}); & U_{\Phi B4} = I_B \cos(\psi_{Ubc} - \psi_{Ib}); \\ U_{\Phi B5} = I_C \cos(\psi_{Uca} - \psi_{Ic}); & U_{\Phi B6} = I_C \cos(\psi_{Ubc} - \psi_{Ic}). \end{cases}, \quad (1.12)$$

Значення напруг на виходах цих фазочутливих випрямлячів (1.12) згідно з виразами (1.11) подаються на входи суматорів С, на виходах яких формуються сумарні напруги, які пропорційні величинам виразів (1.11) (тих, що в квадратних дужках). З виходів суматорів С постійні значення напруги надходять на перші входи ВВН, на другі входи яких подаються діючі значення напруги з давача ДН. Вихідні напруги ВВН відповідно до виразів (1.11) пропорційні режимним параметрам СКП та є функцією як РП в РЕМ, так і несиметрії струмів, при цьому вони однозначно визначають величину і знак параметрів відповідного ємнісного елементу СКП.

Таким чином, пописаний СКП дозволяє здійснювати компенсацію РП мережі та струму зворотної послідовності.

Алгоритм (1.11) після деяких перетворень, що описані в роботі [33], може бути застосований при створенні САК СКП для чотирьохпроводної трифазної мережі.

Загальним недоліком зазначених алгоритмів автоматичного керування СКП і структурних схем САК, які їх реалізують, є відсутність врахування впливу СКП на значення рівнів усталеного відхилення напруги в РЕМ.

До того ж, розглянуті алгоритми автоматичного керування СКП не в повній мірі враховують мультифункціональний вплив СКП на параметри режиму РЕМ. Реалізація описаних алгоритмів призводить до недостатньої

ефективності автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП в умовах несиметрії напруг. Окрім цього, як показано в роботах [34, 35], за деяких обставин, що можуть скластись в електричній мережі, неврахування впливу СКП на значення усталеного відхилення напруг може викликати зниження якості електричної енергії.

Зважаючи на ці недоліки виникає необхідність у проведенні досліджень з питання автоматизації керування параметрами режиму РЕМ за умов несиметрії напруг РЕМ.

1.4. Вибір напрямку досліджень задачі автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП

Для вирішення задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП за наявності несиметрії напруг РЕМ необхідно провести дослідження з наступних питань:

1. Провести обґрунтування методу розв'язку задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП.
2. Розробити структурні схеми САК параметрами режиму РЕМ з СКП і алгоритми розрахунку вектора керування.
3. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК параметрами режиму РЕМ з СКП та здійснити аналіз ефекту від використання розв'язків задач керування параметрами режиму РЕМ шляхом математичного моделювання зазначених САК.

Задачу автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП найбільш доцільно розв'язувати в декілька етапів (рис. 1.9).

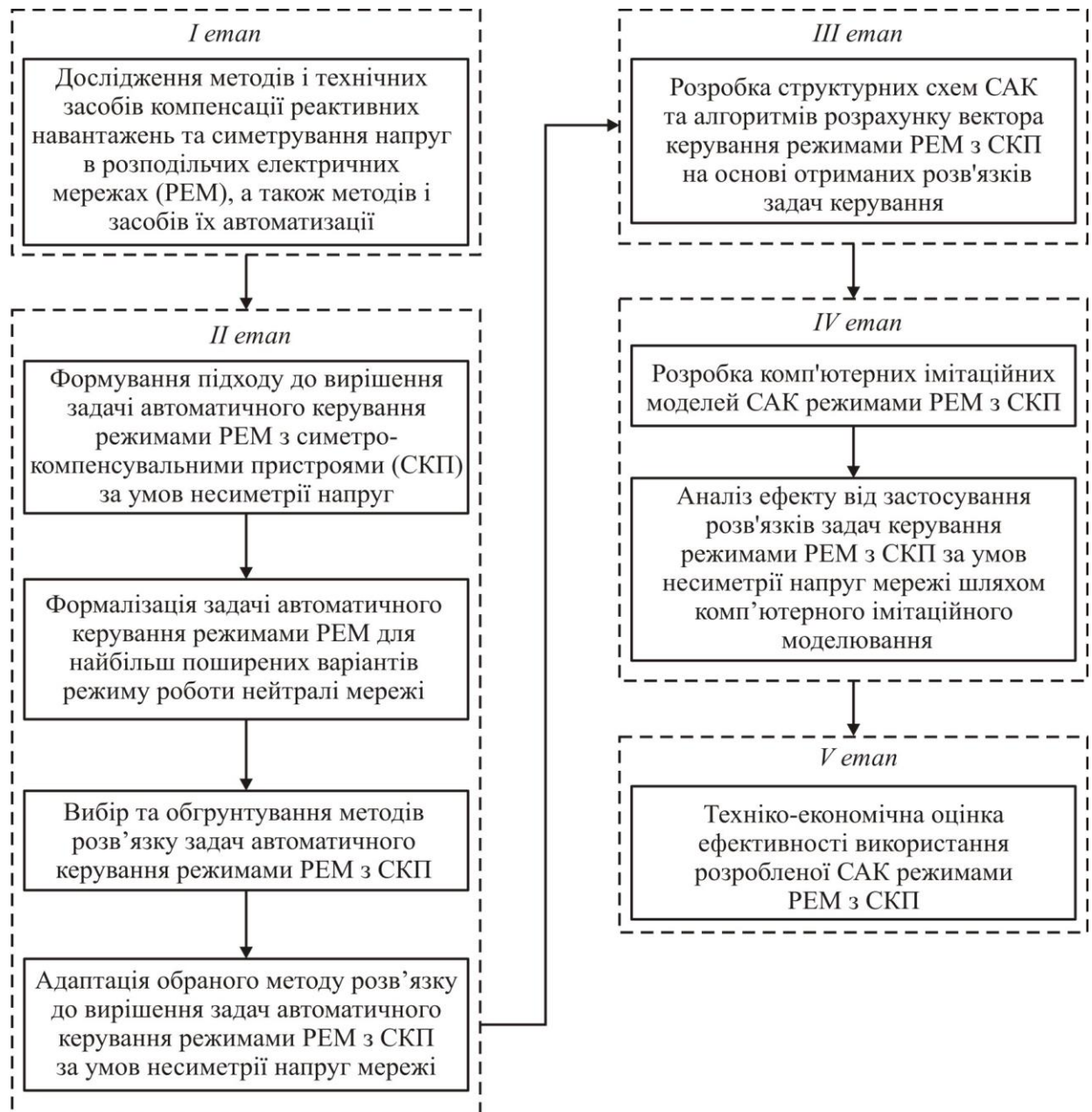


Рис. 1.9. Етапи вирішення задачі автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП за наявності несиметрії напруг РЕМ

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз відомих технічних засобів компенсації РП показав, що найбільш досконалим технічним засобом є БСК з регулювальними секціями, за допомогою яких можна здійснювати автоматичне керування параметрами режиму РЕМ.

2. Аналіз впливу БСК на значення параметрів режиму РЕМ показав, що БСК і створені на їх основі СКП дають змогу здійснювати керований мультифункціональний вплив на параметри режиму РЕМ – на рівні споживання РП, рівні усталеного відхилення і несиметрії напруг.

3. Результати проведеного аналізу методів і технічних засобів автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з допомогою СКП показали, що вони не в досить повній мірі враховують мультифункціональний вплив СКП на параметри режиму РЕМ, що спричиняє недостатню ефективність автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП за умов наявності несиметрії напруг мережі через неврахування впливу СКП на рівні відхилення напруги. Необхідність врахування зазначеної можливості потребує проведення досліджень з питання автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

СКП здійснює мультифункціональний вплив на параметри режиму мережі, а саме на споживання РП, несиметрію та усталене відхилення напруг.

Для здійснення автоматичного керування СКП, яке б забезпечувало одночасне зниження рівнів несиметрії та усталеного відхилення напруг, а також припустимий рівень компенсації РП в РЕМ, необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити взаємозв'язки між вхідними і вихідними параметрами РЕМ з СКП за умов наявності несиметрії напруг для РЕМ з ізольованою нейтраллю;
- формалізувати задачу автоматичного керування СКП, які працюють за умов несиметрії напруг РЕМ;
- здійснити вибір та обґрунтування методу вирішення задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП.

Розв'язанню описаних завдань і присвячений другий розділ роботи.

2.1 Визначення взаємозв'язків між вхідними і вихідними параметрами моделі РЕМ з СКП

Для забезпечення одночасного автоматичного керування рівнями споживання РП, відхиленням та несиметрією напруг в РЕМ потрібно виконувати пофазну зміну ємнісних опорів регулюючих секцій СКП.

Структурна схема САК параметрами режиму мережі, яка містить СКП з пофазною зміною ємнісних опорів регулюючих секцій СКП зображена на рис. 2.1.

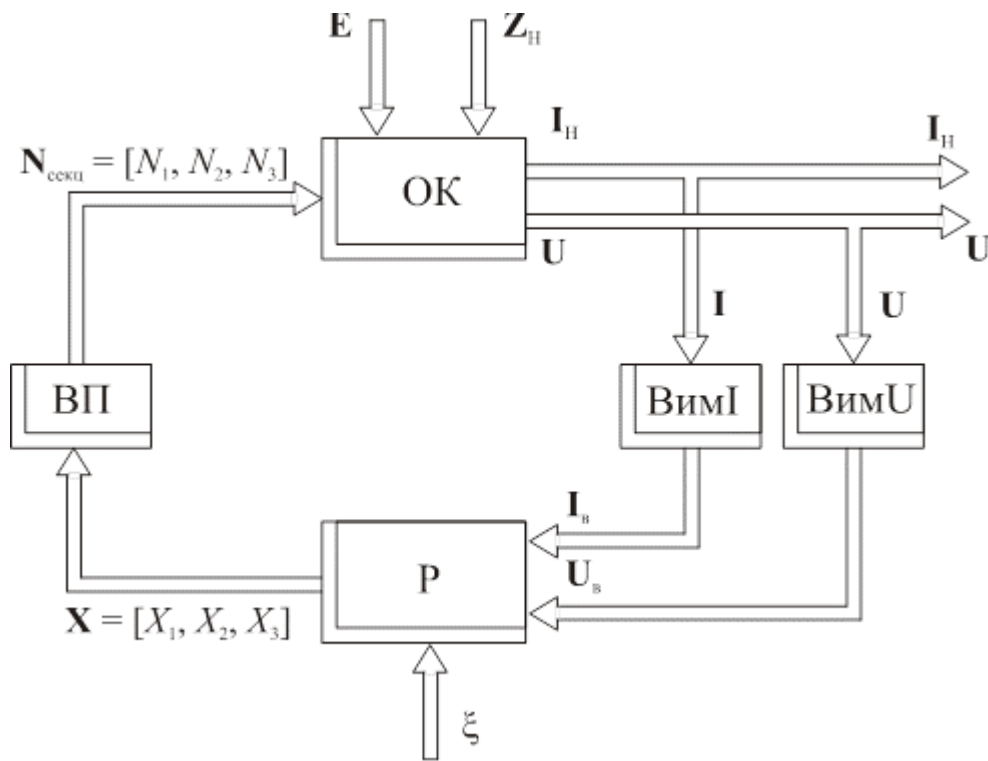


Рис. 2.1. Структурна схема САК

На рисунку 2.1:

ВимI – вимірювач струмів;

ОК – об’єкт керування (РЕМ);

ВимU – вимірювач напруг;

ВП – виконавчий пристрій;

P – регулятор;

$\mathbf{Z}_H$ – матриця комплексів фазних навантажень;

$\mathbf{E}$ – матриця фазних е.р.с. системи;

$\mathbf{U}$ – матриця комплексів напруг;

$\mathbf{I}$ – матриця комплексів струмів;

$\mathbf{I}_B, \mathbf{U}_B$ – матриці виміряних значень струмів і напруг;

$\mathbf{N}_{\text{секц}} = [N_1, N_2, N_3]$ – вектор номерів регулюючих секцій фаз БСК;

$\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3]$ – вектор керування;

ξ – вектор задаючих параметрів.

Задачу автоматичного керування СКП для забезпечення одночасного керування споживанням РП, рівнями несиметрії та відхилення напруг в РЕМ найбільш доцільно розглядати як задачу багатокритеріальної (векторної, мультикритеріальної) оптимізації [37, 38 – 44]. В такому випадку знаходиться мінімум не одного, а багатьох критеріїв одночасно. Такий підхід дає змогу досягти більш прийняттого рішення стосовно кожного з критеріїв.

Залежно від режиму нейтралі РЕМ буде відрізнятись модель об'єкту керування, вектор задаючих параметрів ξ та, зважаючи на це, буде різнитись і постановка задачі автоматичного керування.

Для проведення постановки цієї задачі автоматичного керування як задачі багатокритеріальної оптимізації потрібно визначити взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами об'єкту керування.

В роботі досліджувалися питання автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП (мережа з ізолюваною нейтраллю номінальною напругою 10 кВ). На рис. 2.2 наведена схема заміщення цієї РЕМ.

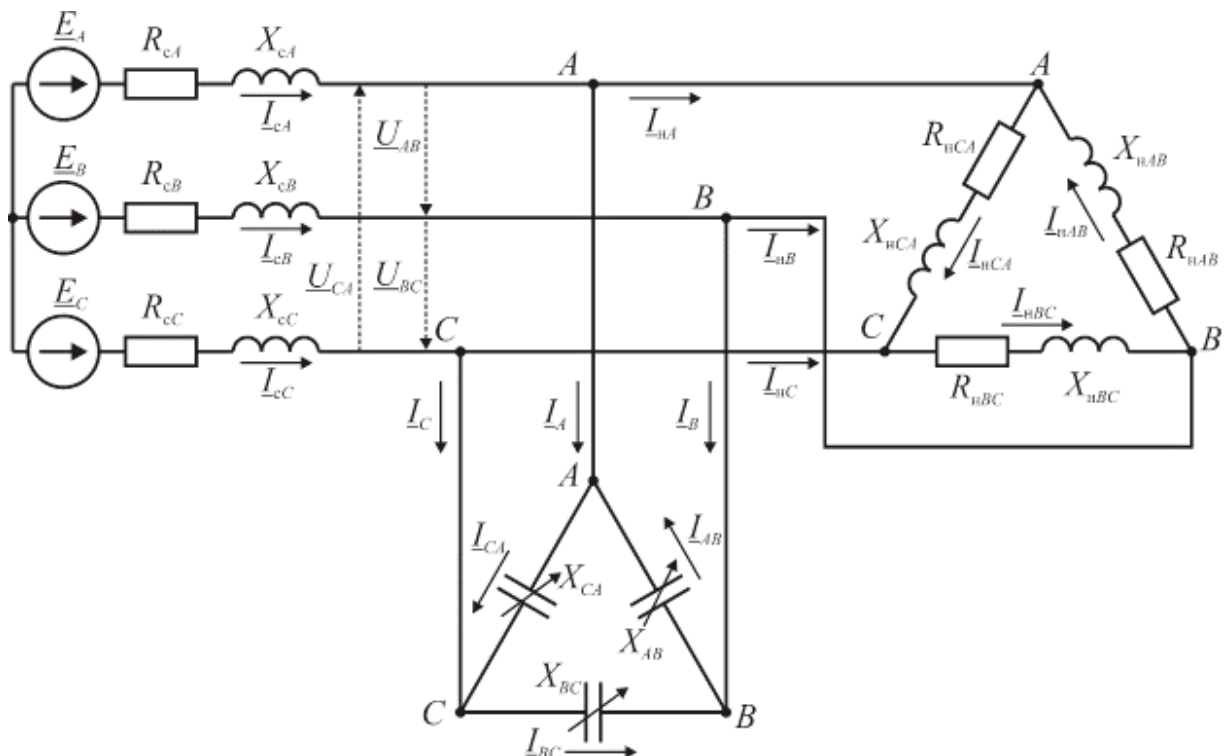


Рис. 2.2. Схема заміщення електричної мережі з ізолюваною нейтраллю номінальною напругою 10 кВ

На рис. 2.2:

$\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – е. р. с. фаз системи живлення;

$R_{cA}, X_{cA}, R_{cB}, X_{cB}, R_{cC}, X_{cC}$ – еквівалентні опори фаз живлячої системи; комплексні опори – $\underline{Z}_{cA} = R_{cA} + jX_{cA}, \underline{Z}_{cB} = R_{cB} + jX_{cB}, \underline{Z}_{cC} = R_{cC} + jX_{cC}$;

$R_{нAB}, X_{нAB}, R_{нBC}, X_{нBC}, R_{нCA}, X_{нCA}$ – опори фаз еквівалентного навантаження, з'єднаного в «трикутник»; відповідно, комплексні опори – $\underline{Z}_{нAB} = R_{нAB} + jX_{нAB}, \underline{Z}_{нBC} = R_{нBC} + jX_{нBC}, \underline{Z}_{нCA} = R_{нCA} + jX_{нCA}$;

X_{AB}, X_{BC}, X_{CA} – ємнісні опори фаз СКП, з'єднаної в «трикутник»;

$\underline{I}_{cA}, \underline{I}_{cB}, \underline{I}_{cC}$ – струми у фазах системи;

$\underline{I}_{нA}, \underline{I}_{нB}, \underline{I}_{нC}$ – лінійні струми навантаження;

$\underline{I}_{нAB}, \underline{I}_{нBC}, \underline{I}_{нCA}$ – струми в фазах еквівалентного навантаження, з'єднаного в «трикутник»;

$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ – лінійні струми СКП;

$\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$ – фазні струми СКП;

$\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ – лінійні напруги у місці приєднання навантаження та СКП.

Схема РЕМ з СКП, яка показана на рис. 2.2, містить лише несиметричну частину СКП. Таке спрощення схеми є правомірним, так в схемі СКП на рис. 1.5 несиметрична і симетрична частини з'єднані паралельно. Тому при створенні математичної моделі доцільно представляти СКП у вигляді змінних опорів, з'єднаних в «трикутник».

Так як електричне навантаження змінюється випадковим чином, то опори $\underline{Z}_{нAB}, \underline{Z}_{нBC}, \underline{Z}_{нCA}$ також змінюватимуться в часі, що потребує їх визначення на кожному кроці роботи системи керування. Це ж саме стосується також і е. р. с. $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$.

Вимірювання напруг в РЕМ здебільшого здійснюється з допомогою трансформаторів напруги. Одна із вторинних обмоток цих трансформаторів

з'єднана в схему «зірка з нулем» – шляхом утворення штучної нульової точки. Тому для РЕМ, схема заміщення якої зображена на рисунку 2.2, визначення напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ не є проблематичним.

Для математичної моделі РЕМ з СКП (рис. 2.2) характерними є такі величини:

- *вхідні сигнали*: опори $\underline{Z}_{HAB}, \underline{Z}_{HBC}, \underline{Z}_{HCA}$; е. р. с $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$;
- *вихідні сигнали*: лінійні струми $\underline{I}_{HA}, \underline{I}_{HB}, \underline{I}_{HC}$; лінійні напруги $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$; фазні напруги $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$;
- *параметри моделі*: опори системи $\underline{Z}_{CA}, \underline{Z}_{CB}, \underline{Z}_{CC}$;
- *керуючі впливи* – опори СКП X_{AB}, X_{BC}, X_{CA} .

Зважаючи на це, для синтезу САК параметрами режиму РЕМ потрібно визначити взаємозв'язок між керуваннями (X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}) і вихідними величинами ($\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}, \underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C, \underline{I}_{HA}, \underline{I}_{HB}, \underline{I}_{HC}$), при відомих параметрах моделі ($\underline{Z}_{CA}, \underline{Z}_{CB}, \underline{Z}_{CC}$).

Вирішення цього завдання доцільно проводити в два етапи:

1. За відомими вимірними вихідними величинами, параметрами моделі і значеннями керуючих сигналів на попередньому кроці автоматичного керування визначити значення збурень, які не піддаються безпосередньому вимірюванню ($\underline{Z}_{HAB}, \underline{Z}_{HBC}, \underline{Z}_{HCA}, \underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$).

2. За наявності повної інформації про математичну модель визначити взаємозв'язок між керуючими сигналами та вихідними параметрами моделі.

Розглянемо алгоритм виконання кожного з цих етапів.

Визначення опорів $\underline{Z}_{HAB}, \underline{Z}_{HBC}, \underline{Z}_{HCA}$ найбільш доцільно проводити таким чином. Спочатку необхідно здійснити перетворення опорів навантаження зі схеми з'єднання «трикутник» в еквівалентну схему з'єднання «зірка» використовуючи наступні загальновідомі формули:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{\text{нА}} = \frac{\underline{Z}_{\text{нАВ}} \underline{Z}_{\text{нВС}}}{\underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нСА}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нВ}} = \frac{\underline{Z}_{\text{нВС}} \underline{Z}_{\text{нАВ}}}{\underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нСА}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нС}} = \frac{\underline{Z}_{\text{нСА}} \underline{Z}_{\text{нВС}}}{\underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нАВ}} + \underline{Z}_{\text{нСА}}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\underline{Z}_{\text{нА}}$, $\underline{Z}_{\text{нВ}}$, $\underline{Z}_{\text{нС}}$ – опори фаз навантаження, з'єднаного за схемою «зірка».

Для визначення опорів $\underline{Z}_{\text{нА}}$, $\underline{Z}_{\text{нВ}}$, $\underline{Z}_{\text{нС}}$ потрібно скористатись законом Ома:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{\text{нА}} = R_{\text{нА}} + jX_{\text{нА}} = \frac{\underline{U}_{\text{А}}}{\underline{I}_{\text{А}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нВ}} = R_{\text{нВ}} + jX_{\text{нВ}} = \frac{\underline{U}_{\text{В}}}{\underline{I}_{\text{нВ}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нС}} = R_{\text{нС}} + jX_{\text{нС}} = \frac{\underline{U}_{\text{нС}}}{\underline{I}_{\text{нС}}}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Здійснивши для опорів навантаження зворотне еквівалентне перетворення схеми із «зірки» в «трикутник» отримаємо опори $\underline{Z}_{\text{нАВ}}$, $\underline{Z}_{\text{нВС}}$, $\underline{Z}_{\text{нСА}}$:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{\text{нАВ}} = \underline{Z}_{\text{нА}} + \underline{Z}_{\text{нВ}} + \frac{\underline{Z}_{\text{нА}} \underline{Z}_{\text{нВ}}}{\underline{Z}_{\text{нС}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нВС}} = \underline{Z}_{\text{нВ}} + \underline{Z}_{\text{нС}} + \frac{\underline{Z}_{\text{нВ}} \underline{Z}_{\text{нС}}}{\underline{Z}_{\text{нА}}}; \\ \underline{Z}_{\text{нСА}} = \underline{Z}_{\text{нС}} + \underline{Z}_{\text{нА}} + \frac{\underline{Z}_{\text{нС}} \underline{Z}_{\text{нА}}}{\underline{Z}_{\text{нВ}}}. \end{cases} \quad (2.3)$$

На рис. 2.3 зображено схему заміщення після здійснення описаних перетворень:

$$\begin{cases} \underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{-jX'_{AB}}; \\ \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{-jX'_{BC}}; \\ \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{-jX'_{CA}}; \end{cases} \quad (2.4a)$$

$$\begin{cases} \underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \\ \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \\ \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}. \end{cases} \quad (2.4b)$$

Аналітичні вирази для визначення еквівалентного опору СКП і навантаження:

$$\begin{cases} \underline{Z}'_{AB} = \frac{jX'_{AB} \underline{Z}_{iAB}}{jX'_{AB} - \underline{Z}_{iAB}}; \\ \underline{Z}'_{BC} = \frac{jX'_{BC} \underline{Z}_{iBC}}{jX'_{BC} - \underline{Z}_{iBC}}; \\ \underline{Z}'_{CA} = \frac{jX'_{CA} \underline{Z}_{iCA}}{jX'_{CA} - \underline{Z}_{iCA}}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для спрощення схеми необхідно здійснити еквівалентне перетворення «трикутник – зірка»:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{eA} = \underline{Z}_{cA} + \underline{Z}'_A; \\ \underline{Z}_{eB} = \underline{Z}_{cB} + \underline{Z}'_B; \\ \underline{Z}_{eC} = \underline{Z}_{cC} + \underline{Z}'_C. \end{cases} \quad (2.6)$$

На рис. 2.4 показана схема заміщення після проведення описаних вище еквівалентних перетворень:

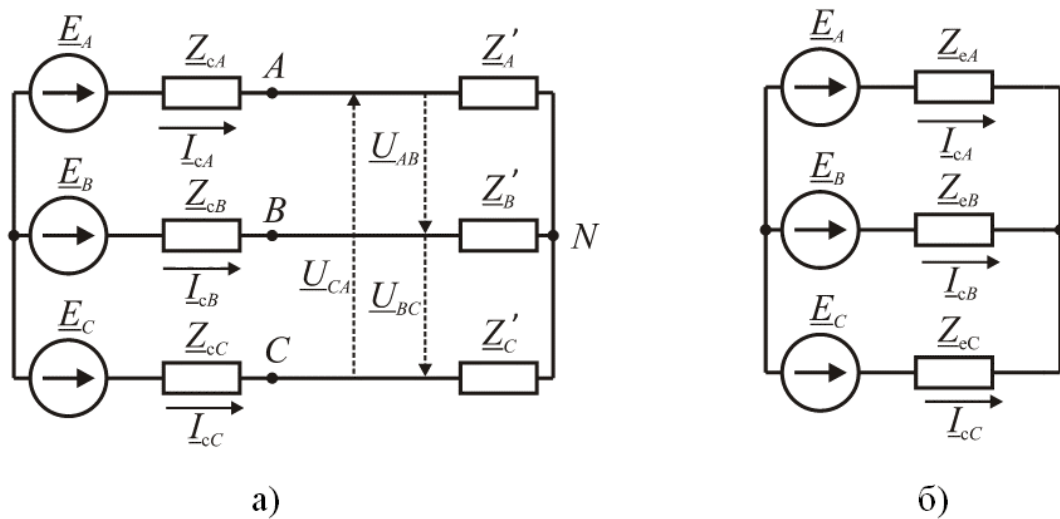


Рис. 2.4. Схема заміщення мережі після еквівалентних перетворень

Зміна навантажень в РЕМ напругою 10 кВ суттєво не впливає на симетрію е.р.с. системи. Зважаючи на це, для схеми заміщення на рис. 2.4 б) можна записати:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cA} \underline{Z}_{eA} - \underline{I}_{cB} \underline{Z}_{eB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B; \\ \underline{I}_{cB} \underline{Z}_{eB} - \underline{I}_{cC} \underline{Z}_{eC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C; \\ \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Розв'язавши систему (2.7) відносно $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$ отримаємо аналітичні вирази для визначення е.р.с. системи:

$$\begin{cases} \underline{E}_A = \frac{2\underline{I}_{cA} \underline{Z}_{eA} - \underline{I}_{cB} \underline{Z}_{eB} - \underline{I}_{cC} \underline{Z}_{eC}}{3}; \\ \underline{E}_B = \frac{2\underline{I}_{cB} \underline{Z}_{eB} - \underline{I}_{cA} \underline{Z}_{eA} - \underline{I}_{cC} \underline{Z}_{eC}}{3}; \\ \underline{E}_C = \frac{2\underline{I}_{cC} \underline{Z}_{eC} - \underline{I}_{cB} \underline{Z}_{eB} - \underline{I}_{cA} \underline{Z}_{eA}}{3}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Отже, використовуючи вирази (2.1) – (2.3) і (2.8) можна визначити шукані опори навантаження та е.р.с системи.

Другий етап розв'язання задачі знаходження взаємозв'язків між вхідними і вихідними параметрами ОК полягає у знаходженні аналітичної залежності струмів $\underline{I}_{cA}, \underline{I}_{cB}, \underline{I}_{cC}$ і напруг $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ від X_{AB}, X_{BC}, X_{CA} . Порядок визначення цієї залежності наступний.

Спочатку для схеми на рис. 2.2 потрібно здійснити перетворення згідно формул (2.6), (2.5), (2.1). В результаті отримаємо схему, яка зображена на рис. 2.4 б). Значення еквівалентних опорів $\underline{Z}_{eA}, \underline{Z}_{eB}, \underline{Z}_{eC}$ для схеми, на рис. 2.4б) функціонально залежать від значень опорів X_{AB}, X_{BC}, X_{CA} :

$$\begin{cases} \underline{Z}_{eA} = f(X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}); \\ \underline{Z}_{eB} = f(X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}); \\ \underline{Z}_{eC} = f(X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}). \end{cases} \quad (2.9)$$

Для спрощення записів ця залежність в явному вигляді не буде вказуватись.

Для схеми заміщення на рис. 2.4 б) потрібно розв'язати зворотну задачу: за відомими е.р.с. $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ та опорами $\underline{Z}_{eA}, \underline{Z}_{eB}, \underline{Z}_{eC}$ визначити струми $\underline{I}_{cA}, \underline{I}_{cB}, \underline{I}_{cC}$. Для схеми заміщення на рис. 2.4 б) скориставшись першим та другим правилами Кірхгофа можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cA}\underline{Z}_{eA} - \underline{I}_{cB}\underline{Z}_{eB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B; \\ \underline{I}_{cB}\underline{Z}_{eB} - \underline{I}_{cC}\underline{Z}_{eC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C; \\ \underline{I}_{cA} + \underline{I}_{cB} + \underline{I}_{cC} = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Вирішуючи цю систему рівнянь відносно $\underline{I}_{cA}, \underline{I}_{cB}, \underline{I}_{cC}$ отримаємо:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cA} = \frac{\underline{E}_A(\underline{Z}_{eB} + \underline{Z}_{eC}) - \underline{E}_B \underline{Z}_{eC} - \underline{E}_C \underline{Z}_{eB}}{\underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eB} + \underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eC} + \underline{Z}_{eB} \underline{Z}_{eC}}; \\ \underline{I}_{cB} = \frac{\underline{E}_B(\underline{Z}_{eA} + \underline{Z}_{eC}) - \underline{E}_A \underline{Z}_{eC} - \underline{E}_C \underline{Z}_{eA}}{\underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eB} + \underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eC} + \underline{Z}_{eB} \underline{Z}_{eC}}; \\ \underline{I}_{cC} = \frac{\underline{E}_C(\underline{Z}_{eA} + \underline{Z}_{eB}) - \underline{E}_A \underline{Z}_{eB} - \underline{E}_B \underline{Z}_{eA}}{\underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eB} + \underline{Z}_{eA} \underline{Z}_{eC} + \underline{Z}_{eB} \underline{Z}_{eC}}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Для знаходження напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ можна використати друге правило Кірхгофа для схеми заміщення на рис. 2.4 а):

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \underline{I}_{cA} \underline{Z}'_A; \\ \underline{U}_B = \underline{I}_{cB} \underline{Z}'_B; \\ \underline{U}_C = \underline{I}_{cC} \underline{Z}'_C. \end{cases} \quad (2.12)$$

Значення напруг $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ можна знайти за виразом:

$$\begin{cases} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{cases} \quad (2.13)$$

Отже, взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами ОК описується виразами (2.11) і (2.13).

2.2 Постановка задач автоматичного керування параметрами режиму РЕМ за умов несиметрії напруг

Для РЕМ з ізольованою нейтраллю характерною є наявність складових напруги прямої і зворотної послідовностей. Зважаючи на це, постановку

задачі автоматичного керування параметрами режиму цієї РЕМ можна записати наступним чином:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X}) = \frac{Q_c(\mathbf{X})}{P_c(\mathbf{X})} \rightarrow \min; \\ \Delta U_1(\mathbf{X}) = \left| \frac{U_1(\mathbf{X}) - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right| \cdot 100 \rightarrow \min; \\ k_{2U}(\mathbf{X}) = \frac{U_2(\mathbf{X})}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.14)$$

де $\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X})$ – коефіцієнт реактивної потужності;

$\mathbf{X} = [X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}]$ – вектор керування;

$P_c(\mathbf{X})$, $Q_c(\mathbf{X})$ – активна і реактивна потужності, що споживаються з мережі;

$U_1(\mathbf{X})$ – напруга прямої послідовності;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі;

$\Delta U_1(\mathbf{X})$ – усталене відхилення трьохфазної напруги;

$U_2(\mathbf{X})$ – діюче значення напруги зворотної послідовності;

$k_{2U}(\mathbf{X})$ – коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю;

$\Omega = \mathbb{R}^3 | X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}, \quad i = AB, BC, CA$ – область допустимих значень $\mathbf{X}$, що визначається діапазоном регулювання СКП;

$X_{i\min}, X_{i\max}, i = AB, BC, CA$ – мінімальне та максимальне значення фазних опорів СКП.

Складові виразів в системі (2.14) можливо визначити, скориставшись раніше знайденими в роботі співвідношеннями між вхідними і вихідними параметрами РЕМ.

Діюче значення напруги прямої послідовності знаходиться згідно методу симетричних складових:

$$U_1(\mathbf{X}) = \left| \frac{1}{3} \left(\underline{U}_{AB}(\mathbf{X}) + a \underline{U}_{BC}(\mathbf{X}) + a^2 \underline{U}_{CA}(\mathbf{X}) \right) \right|. \quad (2.15)$$

Діюче значення напруги зворотної послідовності визначається згідно методу симетричних складових:

$$U_2(\mathbf{X}) = \left| \frac{1}{3} \left(\underline{U}_{AB}(\mathbf{X}) + a^2 \underline{U}_{BC}(\mathbf{X}) + a \underline{U}_{CA}(\mathbf{X}) \right) \right|. \quad (2.16)$$

Для знаходження значень напруг в формулах (2.15) та (2.16) потрібно скористатись виразами (2.13).

Формули для знаходження активної і реактивної потужностей, що споживаються з системи, найдоцільніше знайти через визначення повної потужності скориставшись формулами (2.11) і (2.12).

Повна потужність, яка споживається з системи визначається за наступним чином:

$$\begin{cases} \underline{S}_{cA}(\mathbf{X}) = \underline{U}_A(\mathbf{X}) \bar{I}_{cA}(\mathbf{X}); \\ \underline{S}_{cB}(\mathbf{X}) = \underline{U}_B(\mathbf{X}) \bar{I}_{cB}(\mathbf{X}); \\ \underline{S}_{cC}(\mathbf{X}) = \underline{U}_C(\mathbf{X}) \bar{I}_{cC}(\mathbf{X}); \\ \underline{S}_c(\mathbf{X}) = \underline{S}_{cA}(\mathbf{X}) + \underline{S}_{cB}(\mathbf{X}) + \underline{S}_{cC}(\mathbf{X}). \end{cases} \quad (2.17)$$

З виразів (2.17) можна визначити активну $P_c(\mathbf{X})$ і реактивну $Q_c(\mathbf{X})$ потужності, які споживаються з системи навантаженням із врахуванням генерації реактивної потужності СКП:

$$\begin{cases} P_c(\mathbf{X}) = \operatorname{Re}[\underline{S}_c(\mathbf{X})]; \\ Q_c(\mathbf{X}) = \operatorname{Im}[\underline{S}_c(\mathbf{X})]. \end{cases} \quad (2.18)$$

Отже, використовуючи формули (2.15), (2.16) і (2.18) можливо скласти критеріальні вирази, які входять в постановку задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ (2.19).

2.3 Обґрунтування методу розв'язку задачі керування параметрами режиму РЕМ

В загальному випадку розв'язком задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації є множина точок, яка характеризується тим, що кожна точка зазначеної множини, поступаючись іншим точкам за кількома критеріями, переважає їх як мінімум за одним [37, 38 – 44]. Ця множина точок називається множиною парето-оптимальних розв'язків. Проте такий розв'язок є неприйнятним через те, що для переважної більшості задач потрібно знайти єдиний розв'язок (який належатиме множині парето-оптимальних розв'язків). Для знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації необхідно вводити деяку додаткову інформацію, з допомогою якої здійснюється вибір кінцевого розв'язку із парето-оптимальної множини розв'язків [39].

Як показано в роботах [38, 39] одним з найбільш ефективних методів вирішення задач, подібних до нашої, є метод наближення до утопічної (ідеальної) точки.

Використання даного методу є одним із можливих способів подолання невизначеності в обґрунтуванні пріоритетності критеріїв багатокритеріальної задачі..

Під утопічною (ідеальною) точкою розуміють певну точку $Q_{yt} = (Q_{1min}, Q_{2min}, ..., Q_{mmin})$, координатами якої є оптимальні (мінімальні) значення по кожному з критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

Розв'язання задачі цим методом відбувається в два етапи:

1. Оптимізація окремих критеріїв дає змогу визначити координати утопічної (ідеальної) точки $Q_{yt} = (Q_{yt1}, Q_{yt2}, \dots, Q_{yti})$ в просторі критеріїв $\{Q\} \subset \mathbb{R}^m$.

2. Шляхом вирішення задачі мінімізації відстані ρ від утопічної точки до множини ефективних розв'язків у просторі критеріїв визначаються координати розв'язку задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації K^* , що належать до простору керування $\Omega \subset \mathbb{R}^k$.

Спосіб визначення відстані ρ обирається одним із нижче перерахованих [44]:

$$\rho_{L^p} = \left(\sum_{i=1}^m |Q_i(K) - Q_{yti}|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2.19)$$

Вираз (2.19) задовольняє аксіомам відстані: відстань ρ_{L^1} (при $p=1$) – це архімедова відстань, а ρ_{L^2} (при $p=2$) – це евклідова відстань. При $p \rightarrow \infty$ вираз (2.19) набуває вигляду:

$$\rho_C = \max_{i=1, \dots, m} \{ |Q_i(K) - Q_{yti}| \}. \quad (2.20)$$

Відстань (2.20) називається чебишевською. В залежності від вибору способу визначення відстані, загальний вигляд поверхонь рівновіддаленості $\rho = \text{const}$ відрізняється, внаслідок чого будуть різнитись і самі розв'язки.

Розглянемо більш детально детальніше другий етап вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації для ρ_{L^2} та ρ_C .

1. Мінімізація евклідової відстані ρ_{L^2} (чи квадрату відстані $\rho_{L^2}^2$) [38]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \mu_i \frac{(Q_i(\mathbf{K}) - Q_{yti})^2}{\beta_i} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.21)$$

де β_i – коефіцієнти нормалізації різнорідних критеріїв;
 μ_i – вагові коефіцієнти, які враховують важливість критеріїв.

Геометрична інтерпретація цього методу розв’язку багатокритеріальної для випадку двох критеріїв $Q_1(\mathbf{K})$ і $Q_2(\mathbf{K})$ наведена на рис. 2.5. (точка Q_E)

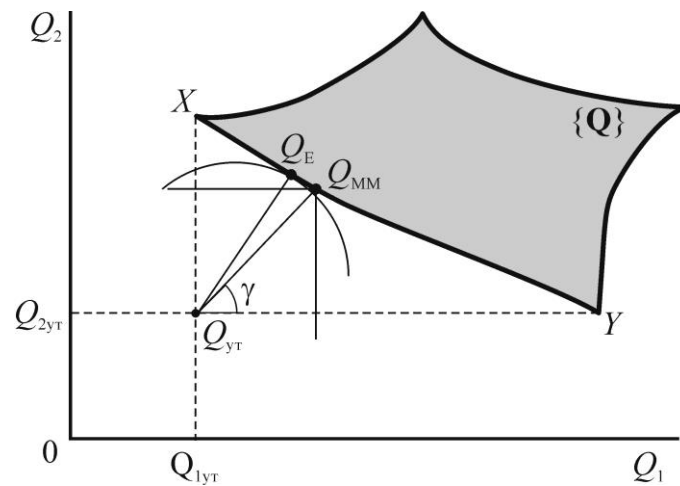


Рис. 2.5. Геометрична інтерпретація знаходження розв’язків задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації для ρ_{L^2} та ρ_C .

2. Мінімізація чебишевської відстані ρ_C [38]:

$$\begin{cases} \max_{i=1 \dots m} \left\{ \mu_i \left| \frac{Q_i(\mathbf{K}) - Q_{yti}}{\beta_i} \right| \right\} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.22)$$

Геометрична інтерпретація цього методу показана на рис. 2.5 (точка Q_{MM}). Як видно з данного рисунка, розв'язком задачі є точка, що знаходиться на перетині кривої XU і променя, який виходить з точки Q_{yt} під кутом γ .

Мінімізація найбільшого із відхилень дає більш «економічний» розв'язок, за якого сума всіх відносних втрат (віддалень від утопічної точки) буде мінімальною.

Для вирішення задачі керування (2.14) методом наближення до утопічної (ідеальної) точки необхідно:

1. Провести вибір найбільш прийняттого способу визначення координат утопічної точки.
2. Запропонувати найдодільніший спосіб знаходження відстані від Q_{yt} до множини парето-оптимальних розв'язків.

2.4 Постановка та вирішення задач визначення координат утопічної точки і оптимальних векторів керування

Задача (2.14) характеризується наявністю трьох критеріїв. Тому процес визначення координат утопічної точки $Q_{yt} = (\text{tg } \varphi_{yt}, \Delta U_{1yt}, k_{2Uyt})$ для цієї задачі зводиться до вирішення 3-х задач скалярної оптимізації функції декількох змінних.

Для знаходження координати $\text{tg } \varphi_{yt}$ потрібно вирішити задачу:

$$\text{tg } \varphi_{yt} = \begin{cases} \text{tg } \varphi(\mathbf{X}) = \frac{Q_c(\mathbf{X})}{P_c(\mathbf{X})} \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.23)$$

Для знаходження координати ΔU_{1yt} потрібно вирішити задачу:

$$\Delta U_{1yt} = \begin{cases} \Delta U_1(\mathbf{X}) = \left| \frac{U_1(\mathbf{X}) - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right| \cdot 100 \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.24)$$

Для знаходження координати k_{2Uyt} потрібно вирішити задачу:

$$k_{2Uyt} = \begin{cases} k_{2U}(\mathbf{X}) = \frac{U_2(\mathbf{X})}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.25)$$

Для визначення критеріальних функцій в задачах (2.23) – (2.25) потрібно використати співвідношення із пункту 2.1 роботи.

В роботі [47] стверджується, що найбільш доцільним способом визначення кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації, аналогічній (2.14), є мінімізація саме евклідової відстані.

Для задачі (2.14) вираз для знаходження кінцевого розв'язку виглядає наступним чином:

$$\mathbf{X}^{opt} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\text{tg } \varphi(\mathbf{X}) - \text{tg } \varphi_{yt}}{K_{\text{tg } \varphi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{X}) - \Delta U_{1yt}}{K_{\Delta U1}} \right)^2 +} \\ \left(\frac{k_{2U}(\mathbf{X}) - k_{2Uyt}}{K_{k2U}} \right)^2 \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.26)$$

де $K_{\text{tg } \varphi}$, $K_{\Delta U1}$, K_{k2U} – вагові коефіцієнти. Вибір цих коефіцієнтів визначається евристичним способом на основі апріорної інформації і уточнюється в результаті комп'ютерного моделювання чи в процесі

експлуатації. В якості даних коефіцієнтів доцільно обирати нормально допустимі значення, що визначені для кожного з критеріїв оптимізації.

Для вирішення оптимізаційних задач першого та другого етапів задачі (2.14) найбільш доцільно скористатись одним із числових методів.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що числовий метод Нелдера-Міда є найбільш придатним для знаходження розв'язків задачі (2.14).

На рис. 2.6. приведена блок-схема алгоритму знаходження мінімуму функції згідно методу Нелдера-Міда

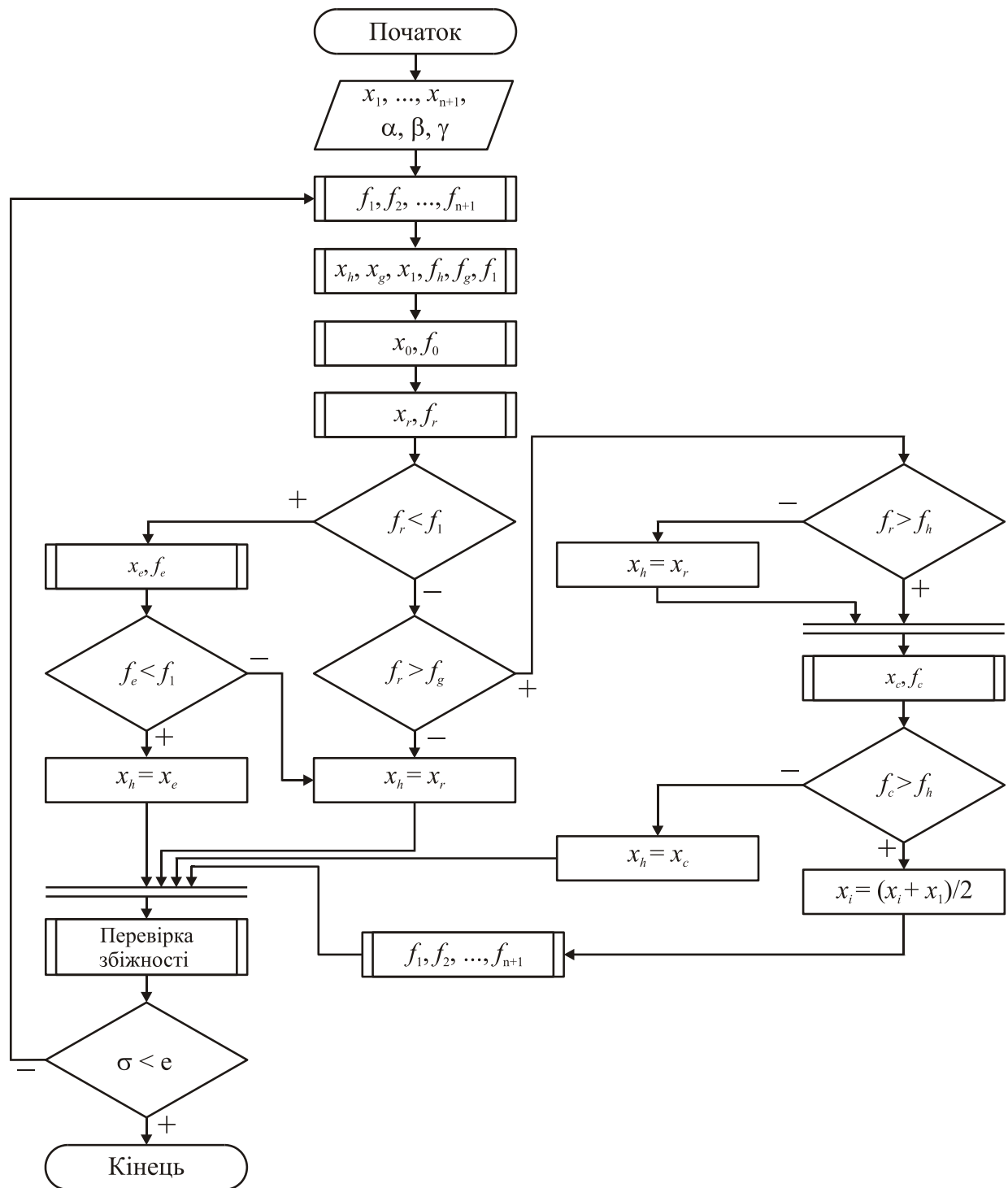


Рис. 2.6. Блок-схема алгоритму визначення мінімуму функції згідно методу Нелдера-Міда

Метод Нелдера-Міда має ряд вагомих переваг в порівнянні з іншими, що і зумовило його широке застосування.

Висновки до розділу

1. Формалізація задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ в умовах несиметрії напруг показала, що задача автоматичного керування режимом зводиться до задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації.

2. В результаті аналізу залежностей між вхідними і вихідними параметрами об'єктів керування визначено кількість і вигляд критеріальних виразів задачі багатокритеріальної оптимізації.

3. В результаті проведеного вибору і обґрунтування методу вирішення задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ як задачі багатокритеріальної оптимізації встановлено, що найдоцільнішим методом вирішення цієї задачі є метод наближення до утопічної точки.

4. Проведений аналіз числових методів оптимізації функції декількох змінних показав, що для задачі оптимізації, яка розглядається в роботі, найбільш доцільно використати метод Нелдера-Міда, якому притаманні висока надійність, швидкодію, та відносна простота реалізації.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Отримані в попередніх розділах результати досліджень дають змогу провести синтез структурних схем САК параметрами режиму РЕМ.

Беручи до уваги досить високий ступінь складності подібного роду САК, ефект від їх використання не очевидний. Для вирішення цього питання здебільшого використовують два підходи: експериментальні дослідження САК в лабораторних (виробничих) умовах чи дослідження їх шляхом імітаційного моделювання. Кожен з цих підходів має свої переваги і недоліки. Враховуючи сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки і відповідних програмних продуктів для імітаційного моделювання (наприклад, пакет Matlab і його розширення Simulink [48 – 52]) в практиці наукових досліджень все більшого поширення знайшов другий підхід. Підвищення достовірності результатів моделювання САК параметрами режиму РЕМ можна досягти результатів, що з високою точністю збігаються з експериментальними дослідженнями.

Отже, для визначення ефекту від використання САК параметрами режиму РЕМ необхідно вирішити наступні завдання:

1. Здійснити синтез структурної схеми САК параметрами режиму РЕМ, а також провести розробку алгоритмів визначення векторів керування для задачі (2.14).

2. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК параметрами режиму РЕМ.

3. Провести аналіз ефекту від використання розроблених САК параметрами режиму РЕМ на розроблених комп'ютерних моделях.

Розв'язанню цих завдань і присвячений третій розділ роботи.

3.1 Структурна схема САК параметрами режиму РЕМ і алгоритм розрахунку оптимального вектора керування

Структурна схема САК із зворотним зв'язком містить наступні основні елементи: об'єкт керування (ОК), пристрої вимірювання вихідних величин, регулятор (що реалізує наперед заданий алгоритм з метою досягнення цілей керування) і виконавчий пристрій (що безпосередньо впливає на ОК). Кожен з цих елементів впливає на процес регулювання, що потрібно враховувати при побудові моделей САК.

Розглянемо питання синтезу САК параметрами режиму РЕМ та питання розроблення алгоритмів розрахунку векторів керування.

Узагальнена структурна схема САК параметрами режиму РЕМ наведена на рис. 3.1.

На рис. 3.1:

$\underline{E} = [\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C]$ – вектор е.р.с. мережі;

$\underline{Z}_H = [\underline{Z}_{HAB}, \underline{Z}_{HBC}, \underline{Z}_{HCA}]$ – вектор опорів еквівалентного навантаження;

$\underline{U}_L = [\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}]$ – вектор лінійних напруг в місці підключення СКП та навантаження до РЕМ;

$\underline{U}_\Phi = [\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C]$ – вектор фазних напруг в місці підключення СКП та навантаження до РЕМ;

$\underline{U}_{LB} = [\underline{U}_{ABb}, \underline{U}_{BCb}, \underline{U}_{CAb}]$ – вектор вимірних значень лінійних напруг в місці підключення СКП та навантаження до РЕМ;

$\underline{I}_H = [\underline{I}_{HA}, \underline{I}_{HB}, \underline{I}_{HC}]$ – вектор лінійних струмів в колі навантаження;

$\underline{U}_{\Phi b} = [\underline{U}_{Ab}, \underline{U}_{Bb}, \underline{U}_{Cb}]$ – вектор вимірних значень фазних напруг в місці підключення СКП та навантаження до РЕМ;

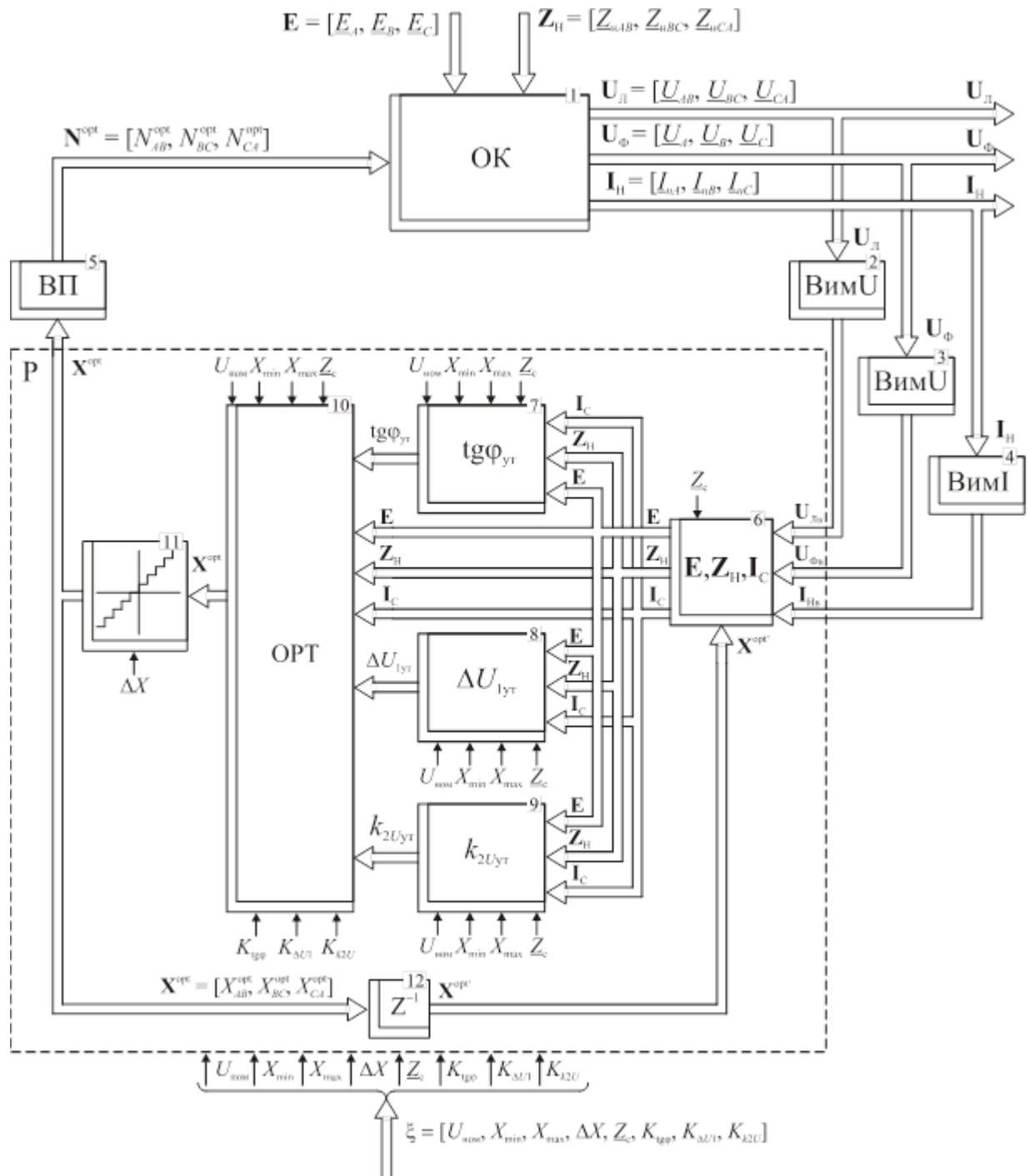


Рис. 3.1. Узагальнена структурна схема САК параметрами режиму

$\mathbf{I}_{\text{Hв}} = [I_{\text{HAB}}, I_{\text{HBB}}, I_{\text{HCB}}]$ – вектор вимірюваних значень лінійних струмів в колі навантаження;

$\mathbf{I}_{\text{C}} = [I_{\text{CA}}, I_{\text{CB}}, I_{\text{CC}}]$ – вектор лінійних струмів в колі мережі;

$U_{\text{ном}}$ – номінальне значення напруги мережі;

$X_{\text{min}}, X_{\text{max}}$ – мінімальне і максимальне значення ємнісного опору СКП;

ΔX – крок зміни ємнісного опору; в роботі розглядався варіант конструкції СКП, за якого крок зміни ємнісного опору однаковий для кожної з фаз на всьому діапазоні регулювання СКП;

$\underline{Z}_c$ – комплекс фазного опору живлячої мережі; в роботі розглядається варіант симетричних фазних опорів мережі;

$K_{\text{tg}\varphi}$, $K_{\Delta U1}$, K_{k2U} – вагові коефіцієнти, які враховують вплив кожного з критеріїв в задачі (2.14);

$\mathbf{X}^{\text{opt}} = (X_{AB}^{\text{opt}}, X_{BC}^{\text{opt}}, X_{CA}^{\text{opt}})$ – оптимальний вектор керування;

$\mathbf{N}^{\text{opt}} = (N_{AB}^{\text{opt}}, N_{BC}^{\text{opt}}, N_{CA}^{\text{opt}})$ – вектор номерів секцій СКП, які відповідають оптимальному вектору керування $\mathbf{X}^{\text{opt}}$;

$\mathbf{X}^{\text{opt}'} = (X_{AB}^{\text{opt}'}, X_{BC}^{\text{opt}'}, X_{CA}^{\text{opt}'}) - \mathbf{X}^{\text{opt}}$, розрахований на попередньому кроці;

P – регулятор параметрів режиму РЕМ;

1 – об'єкт керування;

2, 3 – вимірювальні перетворювачі трьохфазної напруги; ці блоки поєднані у вигляді єдиного пристрою – вимірювального трансформатора напруги;

4 – вимірювальний перетворювач струму навантаження;

5 – виконавчий пристрій, який безпосередньо виконує пофазне перемикання секцій;

6 – блок розрахунку векторів $\mathbf{E}$, $\mathbf{Z}_H$ і $\mathbf{I}_C$;

7, 8, 9 – блоки визначення координат утопічної точки $\text{tg}\varphi_{\text{yt}}$, $\Delta U_{1\text{yt}}$,

$k_{2U_{\text{yt}}}$;

10 – блок розрахунку $\mathbf{X}^{\text{opt}}$;

11 – блок дискретизації значень опорів фаз СКП;

12 – блок часової затримки сигналу.

САК, структурна схема якої наведена на рис. 3.1, працює таким чином. Виміряні значення $U_{\text{Л}}$, $U_{\text{Ф}}$, $I_{\text{Н}}$ та значення X^{opt} і $Z_{\text{с}}$ надходять до блоку 6, де відбувається розрахунок векторів E , $Z_{\text{Н}}$ та $I_{\text{С}}$. Після цього значення E , $Z_{\text{Н}}$, $I_{\text{С}}$ і значення $U_{\text{ном}}$, X_{min} , X_{max} , $Z_{\text{с}}$ надходять до блоків 7 – 9, в яких відбувається розрахунок $\text{tg} \varphi_{\text{ут}}$, $\Delta U_{1\text{ут}}$, $k_{2U_{\text{ут}}}$. Далі дані з блоків 7 – 9 та значення вектора ξ надходять до блоку 10, де визначається кінцевий розв’язок оптимізаційної задачі (2.14) – оптимальний вектор керування X^{opt} . Значення X^{opt} із блоку 10 разом із ΔX надходять до блоку 11, де проводиться квантування вектору керування за рівнем (тим самим враховується дискретність опорів СКП). Отримане значення X^{opt} із блоку 11 надходить на вхід блоку транспортної затримки 12. З блоку 12 значення X^{opt} надходить на вхід блоку 6. Значення X^{opt} із блоку 11 надходять до блоку 5 (виконавчого пристрою), який і виконує перемикання регулювальних секцій СКП у відповідності до вектору N^{opt} .

На рис. 3.2 приведено блок-схему алгоритму розрахунку оптимального вектора керування X^{opt} .

На рис. 3.2:

3 – процедура визначення E , $Z_{\text{Н}}$ та $I_{\text{С}}$;

4 – процедура визначення $\text{tg} \varphi_{\text{ут}}$;

5 – процедура визначення $\Delta U_{1\text{ут}}$;

6 – процедура визначення $k_{2U_{\text{ут}}}$;

7 – процедура визначення X^{opt} .

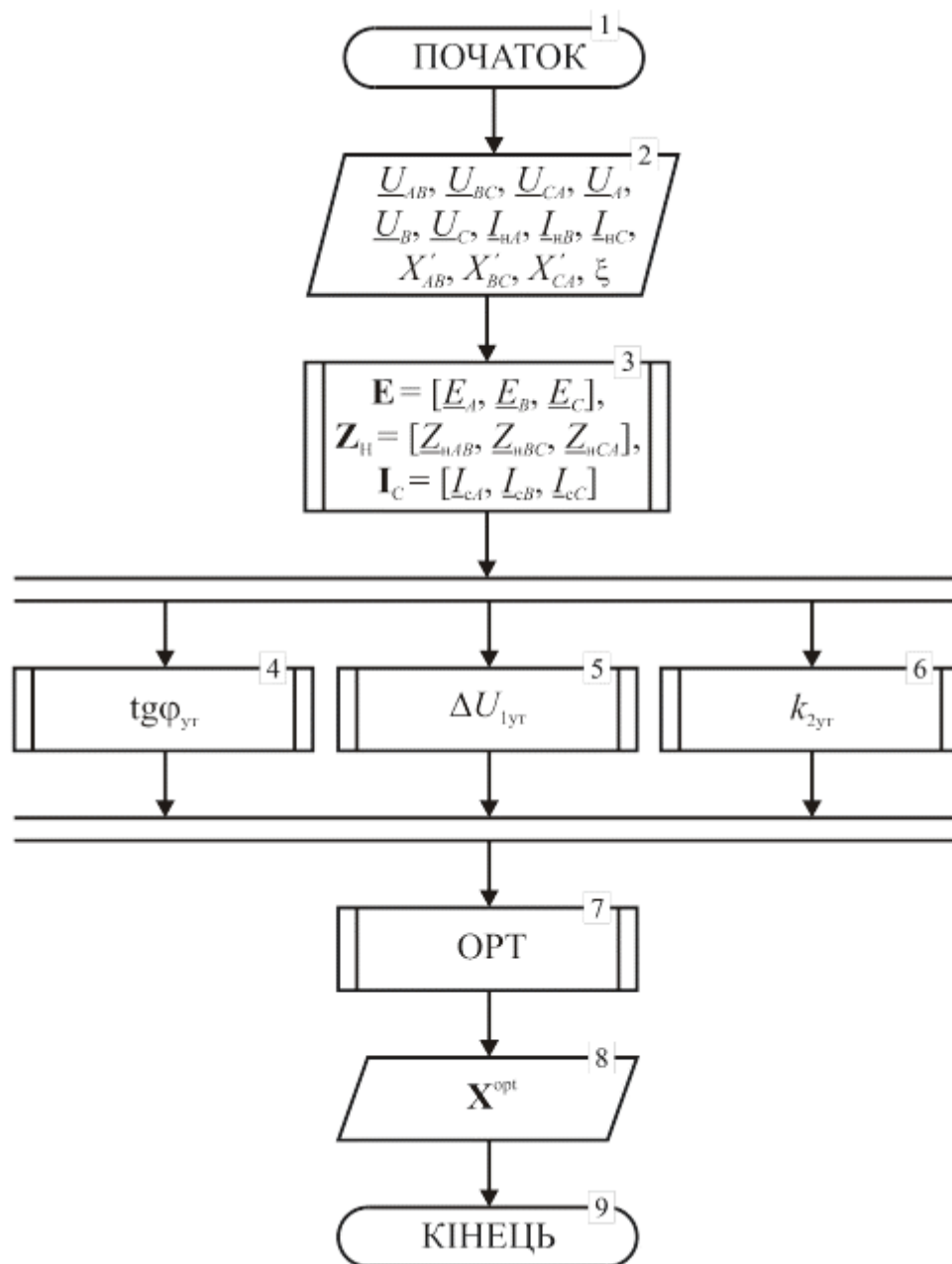


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму розрахунку вектора керування параметрами режиму РЕМ

Отже, розроблена структурна схема САК (рис. 3.1) і алгоритм визначення оптимального вектора керування (рис. 3.2) дають змогу розробити на їх основі комп'ютерну імітаційну модель САК параметрами режиму РЕМ.

3.2 Комп'ютерна модель САК параметрами режиму РЕМ

Для визначення ефекту від використання запропонованих в роботі САК параметрами режиму РЕМ шляхом комп'ютерного моделювання потрібно перш за все на основі розробленої структурної схеми САК і алгоритму визначення оптимального вектора керування розробити комп'ютерну модель САК параметрами режиму РЕМ.

Для вирішення даного завдання перш за все потрібно розробити математичні моделі елементів САК (ОК, ВП, первинних вимірювальних перетворювачі, регулятора).

Беручи до уваги відносно невелику швидкість зміни в часі вхідних, вихідних величин і збурень, що здійснюють вплив на ОК, та на досить тривалий період часу моделювання, який необхідний для розрахунку ефекту від застосування САК параметрами режиму РЕМ при розробці математичних моделей елементів САК було прийнято ряд наступних допущень:

1. *Безінерційність ВП.* Це допущення є прийнятним через те, що величина затримки часу, яку вносить ВП в роботу системи керування є невеликою в порівнянні з часом дискретності САК та співрозмірною з часом проходження електромагнітних перехідних процесів, які виникають в РЕМ внаслідок комутації СКП.

2. *Безінерційність ТС та ТН.* Зазвичай в якості математичних моделей ТС та ТН приймають передаточні функції такого вигляду:

$$W_{\text{тн}}(p) = \frac{k_{\text{тн}}(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)}, \quad (3.1)$$

де $k_{\text{тн}}$ – коефіцієнт трансформації ТН;

T_1, T_2 – постійні часу ТН.

Але, зважаючи на порівняно малі значення T_1 , T_2 (в порівнянні з періодом дискретності регулятора), математичні моделі цих первинних вимірювальних перетворювачів можна описати наступним чином:

$$W_{\text{TH(TC)}}(p) = \frac{1}{k_{\text{TH(TC)}}}, \quad (3.2)$$

де $k_{\text{TC(TH)}}$ – коефіцієнт трансформації ТН (ТС).

3. *Нехтування похибками ТН та ТС.* Зважаючи на те, що СКП – це дискретні пристрої із фіксованою кількістю варіантів ввімкнення ємнісних опорів, вони не дають змогу з абсолютною точністю встановити розраховане значення вектора керування, тобто СКП вносить певну похибку в процес регулювання. Очевидно, що ця похибка буде значно більшою, ніж похибки ТН та ТС.

4. *Нехтування явищами, які виникають під час перехідних процесів в мережі.* З огляду на те, що період дискретності САК є більшим за тривалість електромагнітних перехідних процесів в РЕМ, які виникають внаслідок комутації СКП, врахування явищ, які виникають під час перехідних процесів в РЕМ лише ускладнює математичну модель САК, що призводить до невиправданого збільшення часу моделювання.

Враховуючи прийняті допущення, можна дійти висновку, що найбільш доцільним варіантом побудови математичної моделі САК параметрами режиму РЕМ є математична модель в фазних координатах. Для її побудови необхідно скористатись знайденими в попередньому розділі роботи співвідношеннями між вхідними і вихідними параметрами ОК.

На рис. 3.3 наведена загальна комп'ютерна модель САК параметрами режиму РЕМ.

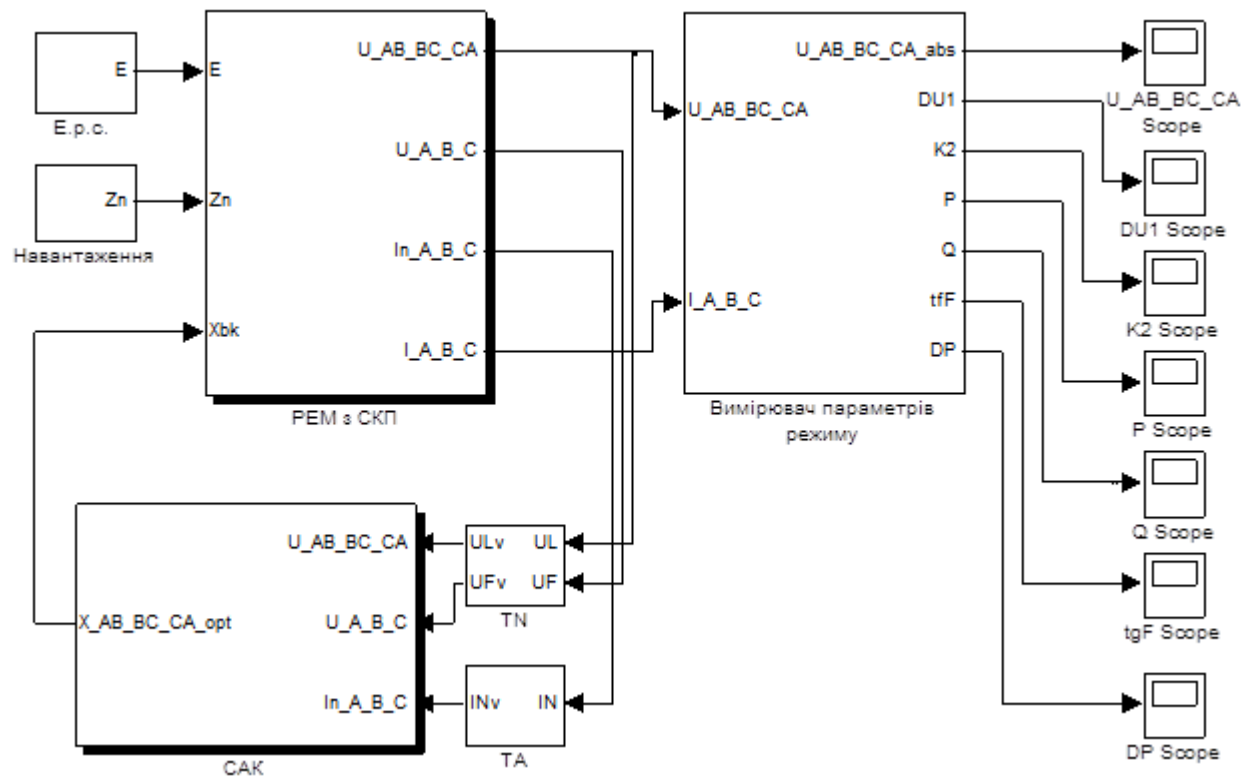


Рис. 3.3. Загальна комп'ютерна модель САК параметрами режиму PEM

На рис.3.3:

- «Е.р.с.» – блок е.р.с. системи;
- «Навантаження» – блок навантаження;
- «РЕМ з СКП» – модель РЕМ;
- «Вимірювач параметрів режиму» – блок визначення параметрів режиму РЕМ;

- «TN» – модель ТН;

- «ТА» – модель ТС;

Модель блоку «РЕМ з СКП» наведена на рис. 3.4.

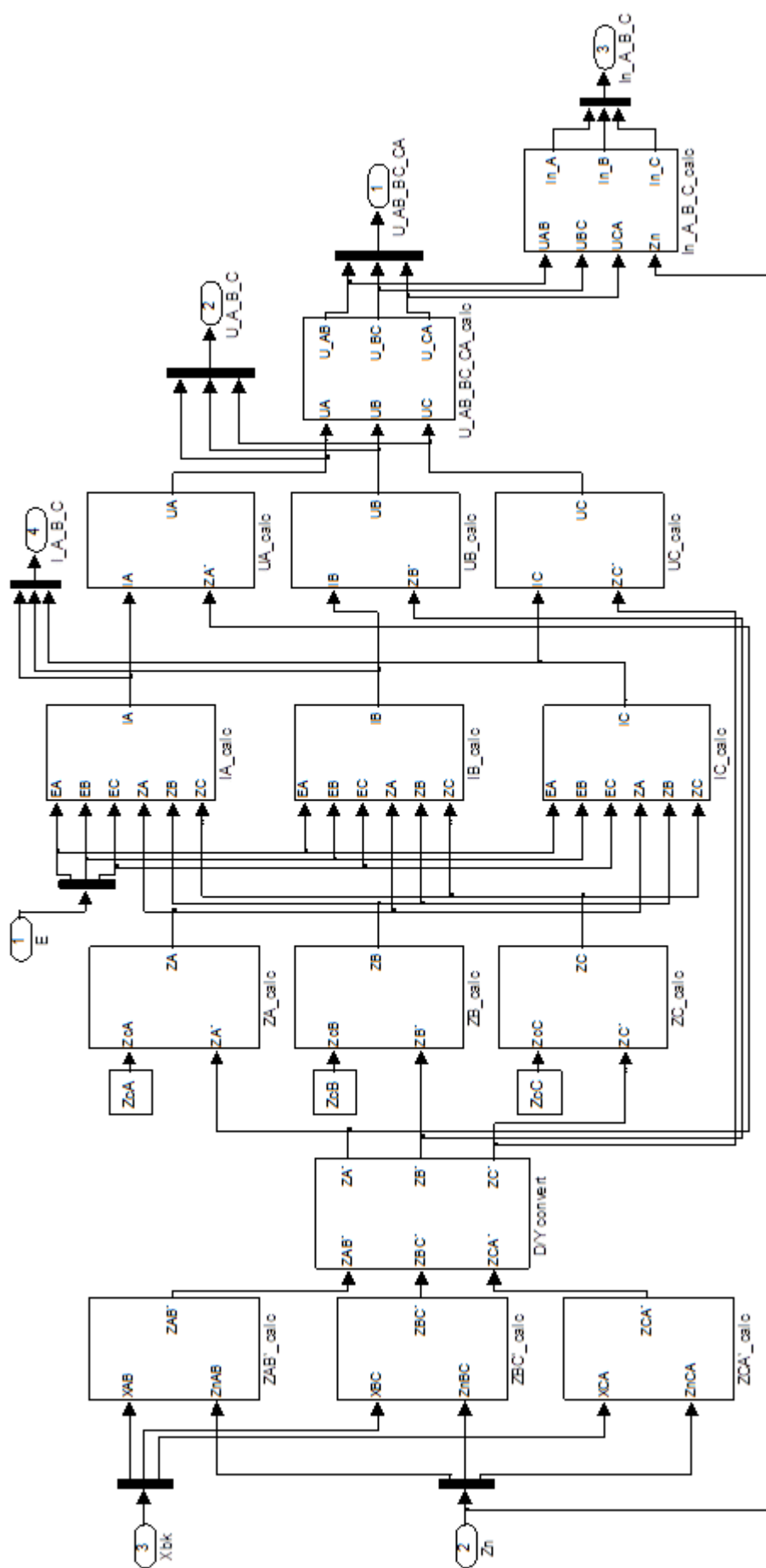


Рис. 3.4. Модель блоку «РЕМ з СКП»

Модель блоку «РЕМ з СКП», яка зображена на рис. 3.4 розроблена на основі співвідношень, що описують взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами ОК.

Як видно з рис. 3.4, вхідними сигналами моделі є е.р.с. мережі (блок «E»), опори навантаження (блок «Zn») і ємнісні опори СКП (блок «Xbk»).

Слід зазначити, що для спрощення моделювання окрема комп'ютерна модель для ВП не створювалась, і в якості сигналу керування в цій моделі виступає вектор $\mathbf{X}^{\text{opt}}$, а не $\mathbf{N}^{\text{opt}}$.

Вихідними сигналами моделі, окрім комплексів лінійних напруг («U_AB_BC_CA»), струмів навантаження («In_A_B_C»), та фазних напруг («U_A_B_C») також є значення фазних струмів системи $\underline{I}_{cA}$, $\underline{I}_{cB}$, $\underline{I}_{cC}$ («I_A_B_C»).

Значення струмів $\underline{I}_{cA}$, $\underline{I}_{cB}$, $\underline{I}_{cC}$ не використовуються у якості вхідних сигналів регулятора, а використовуються в блоці «Вимірювач параметрів режиму» з метою розрахунку параметрів режиму мережі. Такий підхід дає змогу спростити комп'ютерну модель.

Блок «Вимірювач параметрів режиму» слугує для розрахунку таких параметрів:

- усталене відхилення напруги ΔU_1 ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю k_{2U} ;
- споживана активна P_m та реактивна Q_m потужності;
- втрати активної потужності в РЕМ ΔP_m ;
- коефіцієнту реактивної потужності $\text{tg} \varphi$.

Модель блоку «Вимірювач параметрів режиму» приведена на рис. 3.5

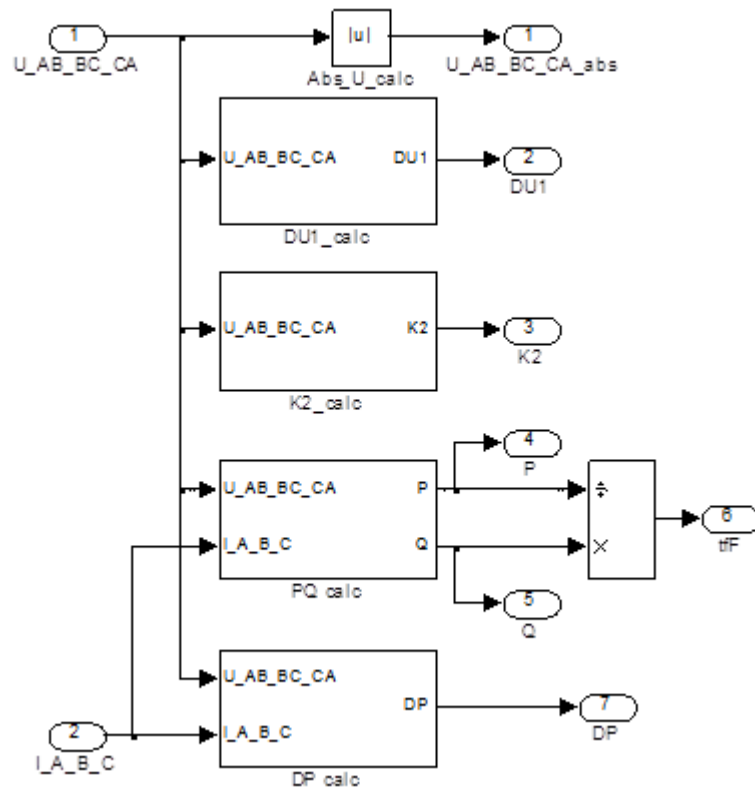


Рис. 3.5. Блок «Вимірювач параметрів режиму»

Модель блоку «Вимірювач параметрів режиму», яка зображена на рис. 3.5, складається з:

- «Abs_U_calc» – блок розрахунку U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} ;
- «DU1_calc» – блок розрахунку ΔU_1 ;
- «K2_calc» – блок розрахунку k_{2U} ;
- «PQ_calc» – блок розрахунку P_m , Q_m , що споживаються з РЕМ;
- «DP_calc» – блок розрахунку ΔP_m в РЕМ.

Для розрахунку $\text{tg } \varphi$ в описаному блоці реалізується співвідношення:

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q_m}{P_m}, \quad (3.3)$$

де P_m , Q_m – активна та реактивна потужності, які споживається з РЕМ.

Модель блоку вимірювання ΔU_1 «DU1_calc» приведена на рис. 3.6.

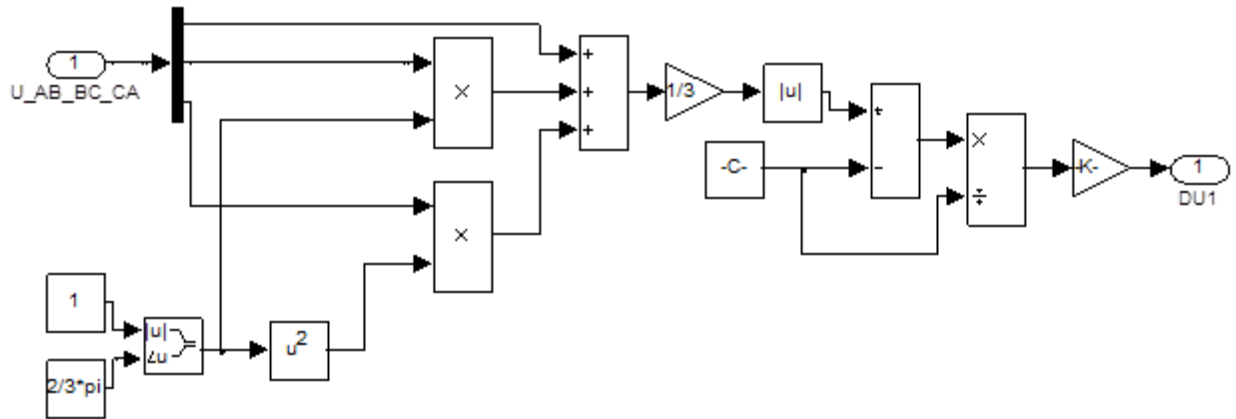


Рис. 3.6. Модель блоку «DU1_calc»

Модель блоку вимірювання k_{2U} «K2_calc» приведена на рис. 3.7.

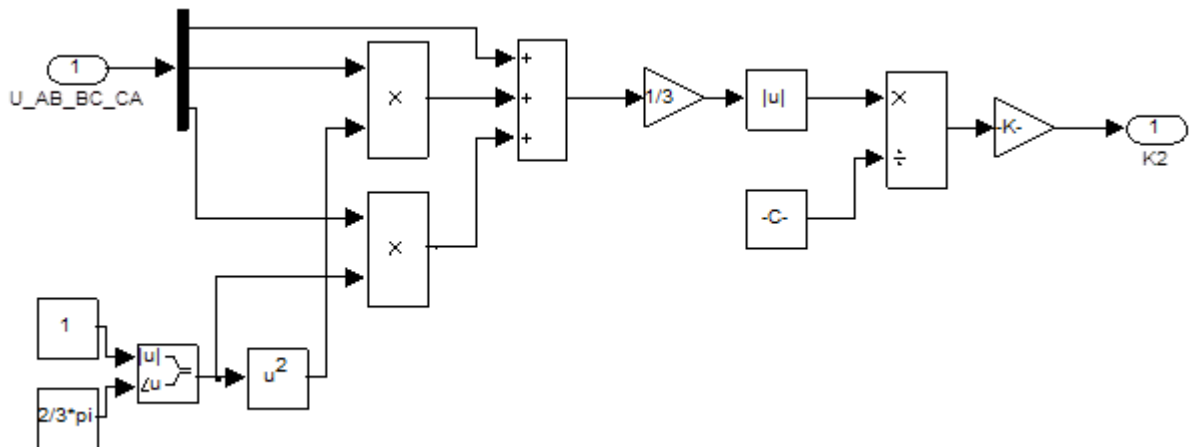


Рис. 3.7. Модель блоку «K2_calc»

На рис. 3.8 наведена модель блоку «PQ_calc», що призначений для розрахунку активної P_M і реактивної Q_M потужностей, які споживаються з PEM,

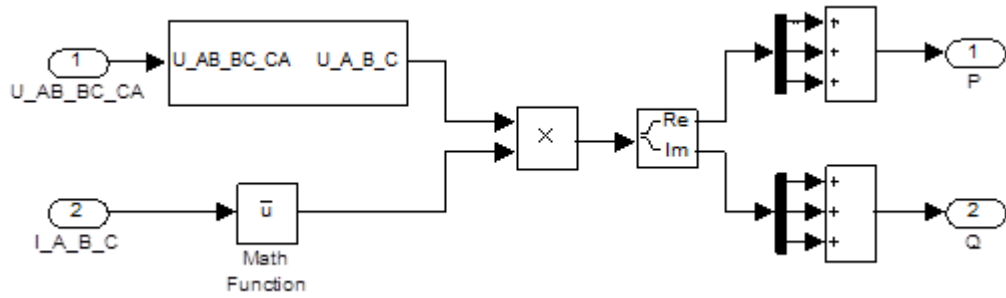


Рис. 3.8. Модель блоку «PQ_calc»

В основу роботи блоку «САК», яка зображена на рис. 3.9, покладено розроблену структурну схему САК параметрами режиму РЕМ, та розроблений в роботі алгоритм визначення оптимального вектора керування.

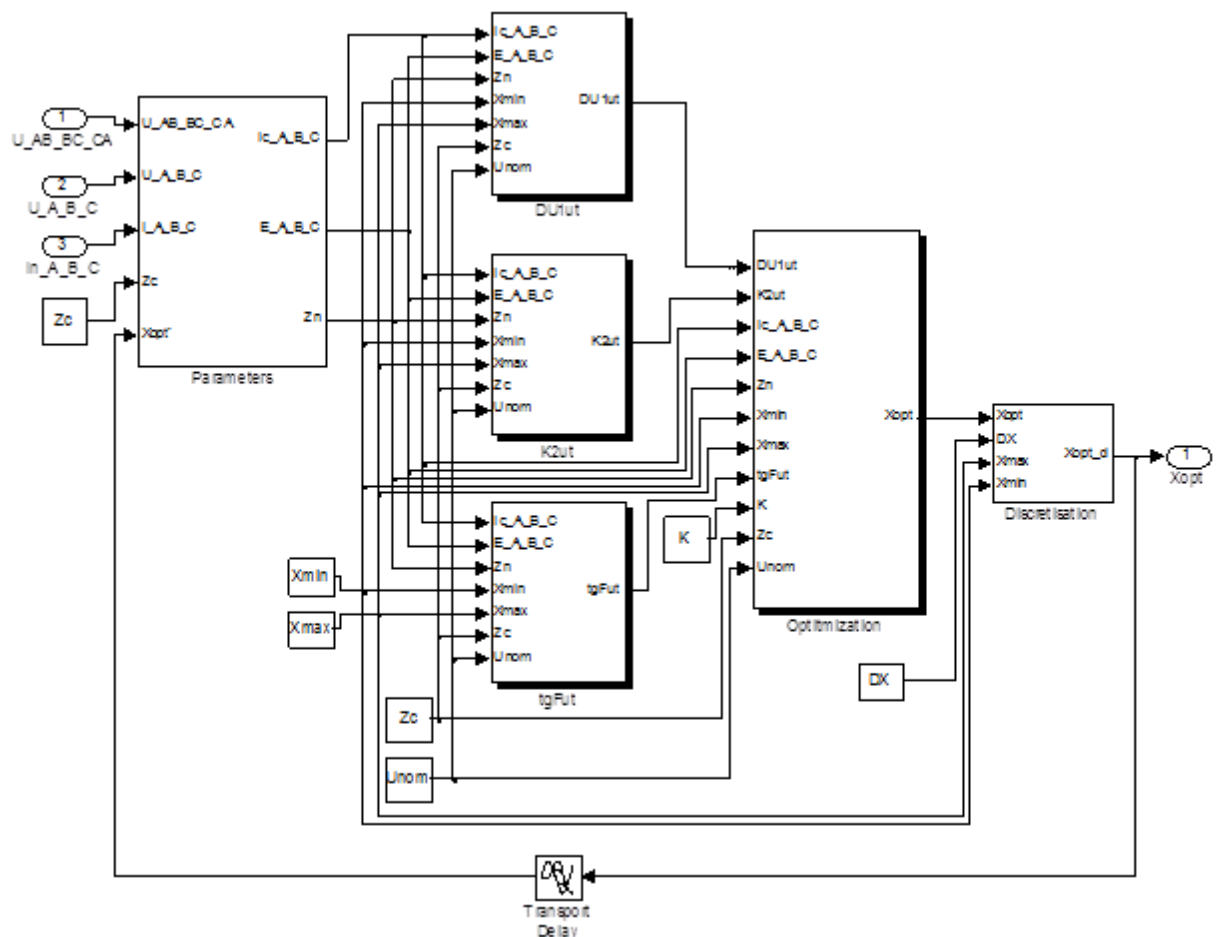


Рис. 3.9. Модель блоку «САК» для Matlab Simulink

Блок «САК» складається з таких підсистем:

- «Parameters» – блок розрахунку векторів $\mathbf{E}$, $\mathbf{Z}_H$ та $\mathbf{I}_C$;
- «DU1ut» – блок розрахунку ΔU_{1UT} ;
- «K2Uut» – блок розрахунку $k_{2U_{UT}}$;
- «tgFut» – блок розрахунку $\text{tg} \varphi_{UT}$;
- «Optimisation» – блок розрахунку $\mathbf{X}^{\text{opt}}$;
- «Discretisation» – блок дискретизації значень $\mathbf{X}^{\text{opt}}$;
- «Transport Delay» – блок транспортної затримки сигналу;
- «Xmin», «Xmin» – блоки задання мінімального і максимального значень опорів СКП;
- «K» – блок задання $K_{\text{tg}\varphi}$, $K_{\Delta U1}$, K_{k2U} ;
- «DX» – блок задання ΔX .

Комп'ютерна модель САК параметрами режиму РЕМ працює наступним чином. Результати експериментальних замірів параметрів режиму РЕМ, які збережені у спеціальних текстових файлах, з допомогою блоків «E.p.c» і «Навантаження» надходять на вхід «РЕМ з СКП», який призначений для моделювання режимів РЕМ. Вихідні сигнали моделі $\mathbf{U}_L$, $\mathbf{U}_\Phi$ і $\mathbf{I}_H$ з «РЕМ з СКП» поступають на вхід «САК», та, разом із сигналом $\mathbf{I}_C$ на вхід «Вимірювач параметрів режиму». В цьому блоці здійснюється розрахунок діючих значень напруг, відхилення напруги ΔU_1 , коефіцієнту k_{2U} , значень P_m та Q_m , значення коефіцієнту $\text{tg} \varphi$ і значення втрат ΔP_m . Ці величини виводяться на осцилографи «DU1_scope», «U_AB_BC_CA_scope», «P_scope», «K2_scope», «tgF_scope», «Q_scope», і «DP_scope» відповідно, та можуть бути збережені для здійснення подальшого аналізу роботи моделі.

Порядок визначення $\mathbf{X}^{\text{opt}}$ в блоці «САК» майже повністю співпадає з описаним в роботі алгоритмом роботи структурної схеми САК параметрами режиму РЕМ, що зображена на рис. 3.1. Відмінність полягає в тому, що в якості керуючого сигналу подається не $\mathbf{N}^{\text{opt}}$, а $\mathbf{X}^{\text{opt}}$. Слід зазначити, що

блоки визначення координат утопічної точки («DU1ut», «K2Uut», «tgFut»), блок розрахунку оптимального вектору керування (блок «Optimisation») і блок дискретизації значень $\mathbf{X}^{\text{opt}}$ («Discretisation») реалізовані програмно із використанням мови програмування MATLAB. Для інтеграції алгоритмів, створених на мові програмування MATLAB в Simulink був використаний стандартний блок із бібліотеки Simulink «MATLAB Function».

3.3 Розрахунок параметрів комп'ютерних моделей РЕМ

Розроблені в роботі комп'ютерні моделі РЕМ є досить універсальними, з їх допомогою можливо визначити ефективність використання розроблених САК. Але, для проведення комп'ютерного моделювання потрібно знати числові значення параметрів моделей.

На рис. 3.10 наведена принципова схема РЕМ, для якої проводилось комп'ютерне імітаційне моделювання.

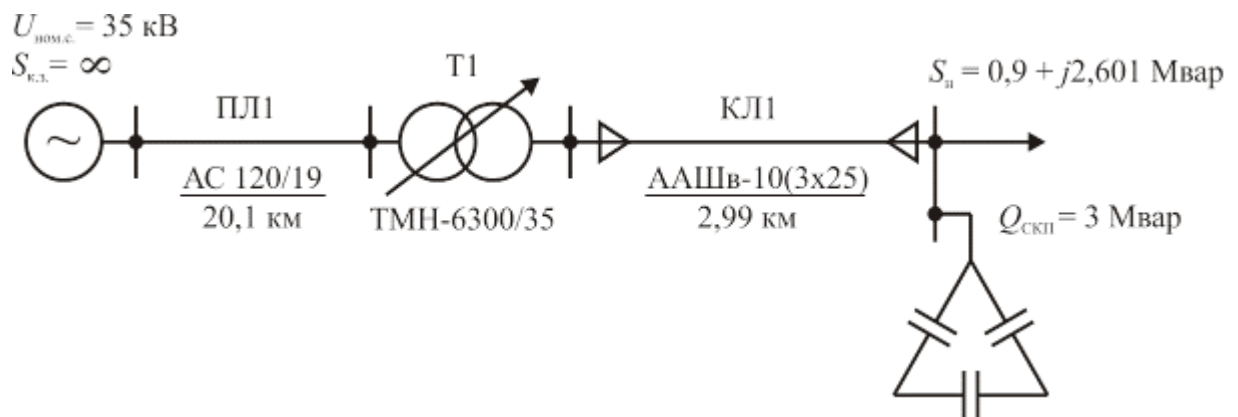


Рис. 3.10. Принципова схема РЕМ

Технічні дані елементів РЕМ:

1. ПЛ1 – АС 120/19:

$$r_{0\text{ПЛ}} = 0,244 \text{ Ом/км}; x_{0\text{ПЛ}} = 0,414 \text{ Ом/км}; L_{\text{ПЛ}} = 20,1 \text{ км}.$$

2. Т1 – ТМН-6300/35:

$S_H = 6,3 \text{ МВА}$; $\Delta P_{\text{к.з.}} = 46,5 \text{ кВт}$; $u_{\text{к, \%}} = 7,5 \%$; $U_{\text{ВН}} = 35 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН}} = 10 \text{ кВ}$;

3. КЛ1 – ААШВ-10(3х25):

$r_{0\text{КЛ}} = 1,24 \text{ Ом/км}$; $x_{0\text{КЛ}} = 0,099 \text{ Ом/км}$; $L_{\text{КЛ}} = 2,986 \text{ км}$.

4. СКП:

$Q_{\text{СКП}} = 1 \text{ Мвар}$; к-сть ступенів регулювання $n = 10 \times 100 \text{ квар}$.

Для розрахунку параметрів моделі (опори фаз системи $\underline{Z}_c = R_c + jX_c$ і опори фаз СКП X_{AB} , X_{BC} , X_{CA} для схеми на рис. 3.10) було складено схему заміщення (рис. 3.11).

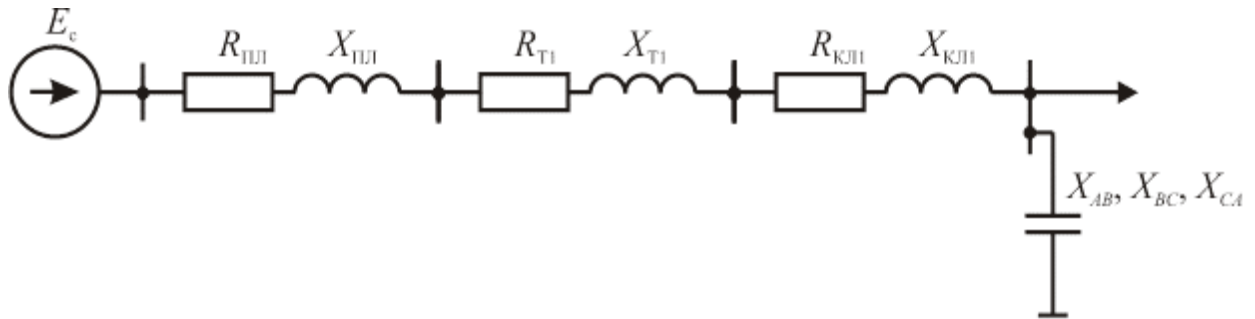


Рис. 3.11. Схема заміщення РЕМ

Проведемо розрахунок параметрів схеми заміщення, зображеної на рис. 3.11:

1. Опори ПЛ1:

$$R_{\text{ПЛ}} = r_{0\text{ПЛ}} \cdot L_{\text{ПЛ}} = 0,244 \cdot 20,1 = 4,902 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{ПЛ}} = x_{0\text{ПЛ}} \cdot L_{\text{ПЛ}} = 0,414 \cdot 20,1 = 8,317 \text{ Ом}.$$

2. Опори Т1:

$$R_T = \Delta P_{\text{к.з.}} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{н.т.}}^2} \cdot 10^{-3} = 46,5 \frac{35^2}{6,3^2} \cdot 10^{-3} = 1,435 \text{ Ом},$$

$$X_T = \frac{u_{к,\%}}{100} \frac{U_{ВН}^2}{S_{н.т.}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{35^2}{6,3} = 14,583 \text{ Ом}$$

3. Опори КЛ1:

$$R_{КЛ} = r_{0КЛ} \cdot L_{КЛ} = 1,24 \cdot 2,986 = 3,703 \text{ Ом},$$

$$X_{КЛ} = x_{0КЛ} \cdot L_{КЛ} = 0,099 \cdot 2,986 = 0,296 \text{ Ом}.$$

4. Опори фаз живлячої мережі R_c , X_c приведені до сторони напруги 10 кВ:

$$R_c = (R_{ПЛ} + R_T) \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 + R_{КЛ} = (4,902 + 1,435) \cdot \left(\frac{10}{35} \right)^2 + 3,703 = 4,22 \text{ Ом},$$

$$X_c = (X_{ПЛ} + X_T) \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 + X_{КЛ} = (8,317 + 14,583) \cdot \left(\frac{10}{35} \right)^2 + 0,296 = 2,165 \text{ Ом}$$

5. Опір фази СКП:

$$X_{номAB} = X_{номBC} = X_{номCA} = \frac{U_{номЛ}^2}{Q_{СКП}} \cdot 3 = \frac{10^2}{3} \cdot 3 = 100 \text{ Ом}$$

Таким чином було, проведено розрахунок параметрів моделі РЕМ який дає змогу перейти до комп'ютерного імітаційного моделювання параметрами режиму РЕМ.

3.4 Комп'ютерне моделювання САК параметрами режиму РЕМ з СКП

Для визначення ефекту від використання розв'язків задачі керування (2.14) були використані розроблені комп'ютерна модель САК параметрами

режиму РЕМ. В якості вхідних параметрів для моделі використовувались результати попередньої обробки експериментальних вимірювань параметрів режиму, проведених в РЕМ ПАТ «Кіровоградобленерго» з допомогою аналізатора мережі FLUKE 1744.

В якості базової моделі з метою проведення порівняльного моделювання була обрана модель САК СКП, що описана в першому розділі роботи. Ця САК не враховує обмеження на значення усталеного відхилення напруги. Для її реалізації було використано комп'ютерні моделі САК параметрами режиму РЕМ зі зміненим відповідним чином алгоритмом роботи блоку прийняття керуючого сигналу. Через те, що алгоритм роботи блоку прийняття керуючого сигналу реалізується програмно на вбудованій в MATLAB мові програмування, така зміна не викликала значних труднощів.

Комп'ютерне моделювання роботи САК параметрами режиму РЕМ полягало в наступному. Для кожного із вимірюваних параметрів режиму РЕМ проводився розрахунок вектора керування і параметрів режиму в точці приєднання навантаження і СКП до мережі, які встановлюються після регулювання, для двох варіантів:

- для базової САК параметрами режиму РЕМ;
- для розробленої в роботі САК параметрами режиму РЕМ.

Розроблені комп'ютерні моделі дозволяють визначати та зберігати значення показників якості електроенергії та інших параметрів режиму з метою подальшої їх статистичної обробки та представити в графічному вигляді.

Статистична обробка результатів комп'ютерного моделювання полягала в розрахунку математичного очікування, середньоквадратичного відхилення та інтегральної ймовірності потрапляння ПЯЕ у нормально допустимі межі, що визначається за формулою:

$$P(x \leq x_{нд.}) = \frac{n_{нд.}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.4)$$

де P – інтегральна ймовірність потрапляння ПЯЕ в нормально допустимі межі;

$n_{\text{н.д.}}$ – кількість спостережень, які потрапляють в нормально допустимі межі;

n_{Σ} – сумарна кількість спостережень (для проведення моделювання було взято добову вибірку виміряних значень параметрів із інтервалом усереднення 1 хв., $n_{\Sigma} = 1440$ значень).

$x_{\text{н.д.}}$ – нормально допустиме значення ПЯЕ;

x – виміряне значення ПЯЕ;

У випадку однакових значень Δt_i моделі, значення активних втрат електроенергії визначається за формулою:

$$\Delta W = R_{\text{мер}} \frac{T}{n_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} (I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2) , \quad (3.5)$$

де $R_{\text{мер}}$ – активний опір елементів РЕМ, Ом;

I_{Ai} , I_{Bi} , I_{Ci} – діючі значення струмів, кА

T – час моделювання, год.

Для визначення ефекту від використання розв'язку задачі керування (2.14) було проведено комп'ютерне моделювання роботи розробленої і базової САК параметрами режиму РЕМ, а також проведено статистичну обробку результатів моделювання. Результати комп'ютерного моделювання роботи цих САК для обох варіантів показані на рис. 3.12 – 3.17. Результати статистичної обробки параметрів для базової і розробленої моделей САК, приведені в табл. 3.1.

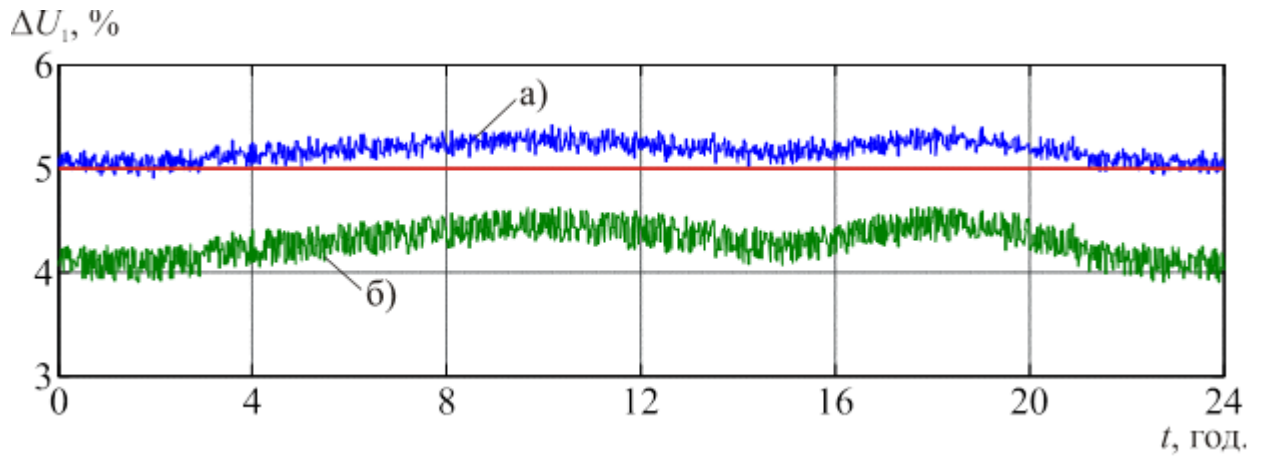


Рис. 3.12. Графіки зміни ΔU_1 для розробленої (б) та базової (а) САК

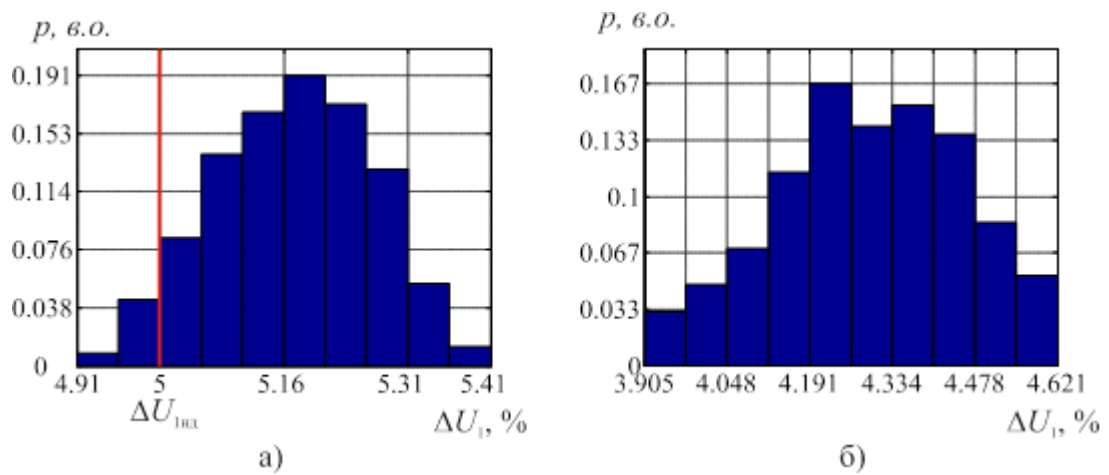


Рис. 3.13. Гістограми розподілу ймовірностей ΔU_1 для розробленої (б) та базової (а) САК

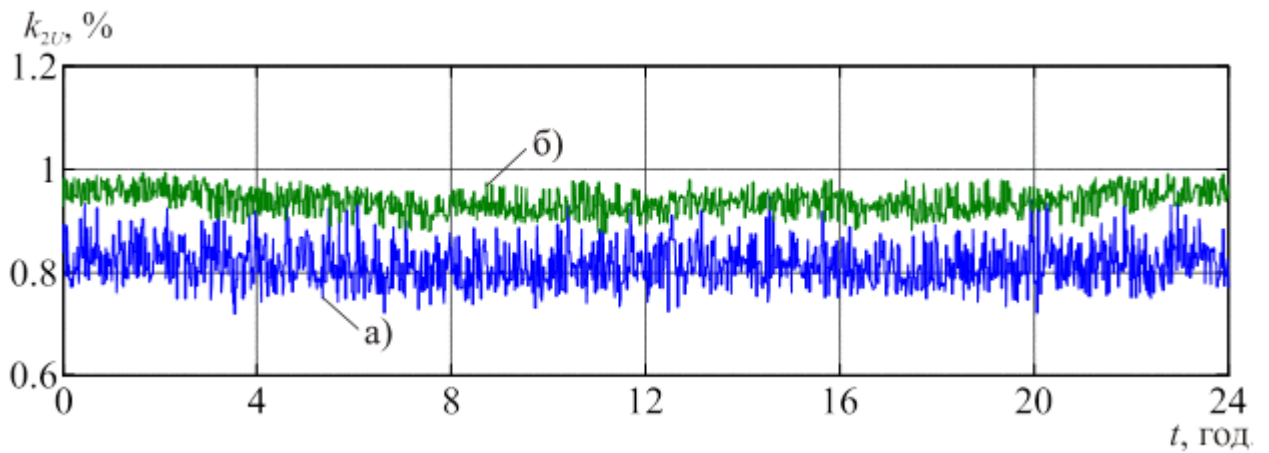


Рис. 3.14. Графіки зміни k_{2U} для розробленої (б) та базової (а) САК

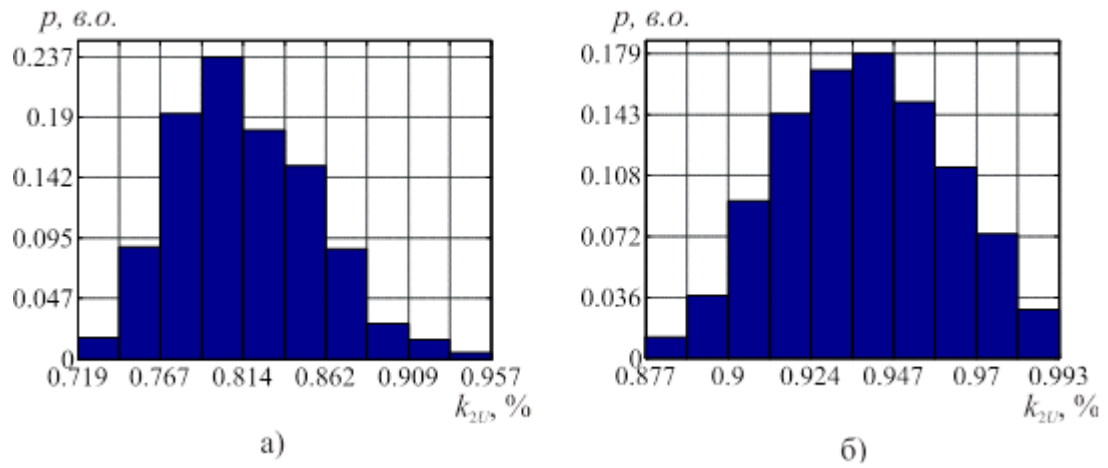


Рис. 3.15. Гістограми розподілу ймовірностей k_{2U} для розробленої (б) та базової (а) САК

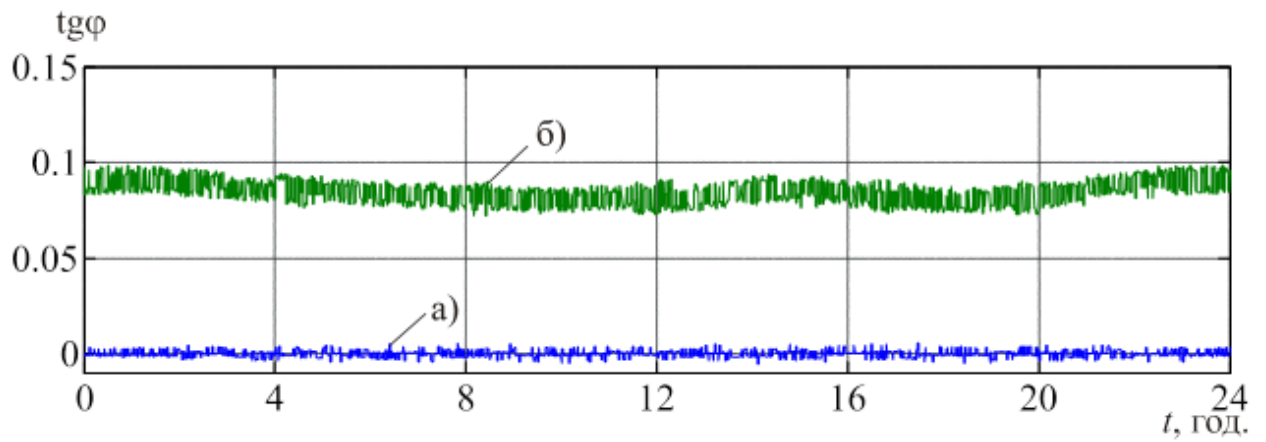


Рис. 3.16. Графіки зміни $\text{tg}\varphi$ для розробленої (б) та базової (а) САК

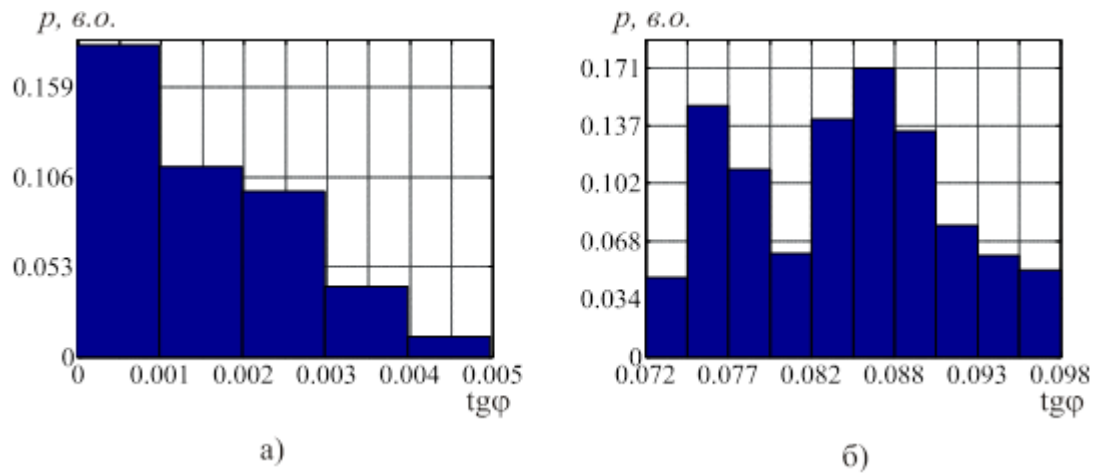


Рис. 3.17. Гістограми розподілу ймовірностей $\text{tg}\varphi$ для розробленої (б) та базової (а) САК

Таблиця 3.1. Результати статистичної обробки значень параметрів режиму для варіантів моделювання, що розглядалися в роботі

№ з/п	Параметр режиму	Матем. очікування параметру, M	СКВ, σ^2	Інтегральна ймовірн., $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
Базова САК				
1.	$\Delta U_1, \%$	5,1710	0,0970	0,0420
2.	$k_{2U}, \%$	0,8150	0,0400	1,0000
3.	$\text{tg } \varphi$, в.о.	0,0100	0,0020	-
4.	$\Delta W_6^{\text{доб}}$, кВт·год	1677,70		
Розроблена САК				
5.	$\Delta U_1, \%$	4,2930	0,1620	1,0000
6.	$k_{2U}, \%$	0,9380	0,0230	1,0000
7.	$\text{tg } \varphi$, в.о.	0,0840	0,0070	-
8.	$\Delta W_p^{\text{доб}}$, кВт·год	1663,50		

Як видно з результатів моделювання і подальшої статистичної обробки, при використанні базової моделі САК параметрами режиму РЕМ спостерігаються значення ΔU_1 , що не задовольняють вимогам діючих нормативних документів стосовно цього ПЯЕ ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,042$). У випадку застосування розробленої в роботі САК рівень ΔU_1 задовольняє вимогам нормативних документів стосовно цього ПЯЕ ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$). Окрім цього, з таблиці 3.1 видно, що рівні коефіцієнтів несиметрії k_{2U} як для випадку базової САК, так і для випадку розробленої САК задовольняють вимогам нормативних документів.

Результати розрахунку втрат активної енергії $\Delta W_p^{\text{доб}}$ показали, що при застосуванні розробленої САК, незважаючи на більше, в порівнянні з базовою САК значення коефіцієнту реактивної потужності ($M(\text{tg } \varphi_p) = 0,084 > M(\text{tg } \varphi_6) = 0,010$), значення активних втрат виявились меншими ($\Delta W_p^{\text{доб}} = 1677,7 \text{ кВт} \cdot \text{год.} > \Delta W_6^{\text{доб}} = 1663,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$). Але, такі

результати розрахунку зумовлені не скільки перевагами запропонованої САК, а скоріш певною недосконалістю математичної моделі навантаження (в якості математичної моделі електричного навантаження було обрано найпростішу модель – активно-реактивний опір). Очевидно, що при збільшенні рівня напруги на затискачах деяких споживачів (наприклад, електричних печей опору, асинхронних двигунів і т.д.) буде спостерігатись дещо вищий рівень споживання активної та реактивної енергії, що і буде спричиняти додаткові втрати активної потужності в опорах елементів РЕМ, що і спостерігається в нашому випадку.

Висновки до розділу

1. Створені на основі знайдених розв'язків задачі керування структурна схема САК і алгоритм розрахунку оптимального вектора керування дали змогу розробити комп'ютерні моделі, з допомогою яких було проведено аналіз роботи розроблених САК параметрами режиму РЕМ.

2. Проведений аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування параметрами режиму РЕМ шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання показав, що при використанні розробленої САК рівень ΔU_1 , на відміну від базової САК, в повній мірі задовольняє вимогам чинних нормативних документів ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$).

3. Результати комп'ютерного моделювання показали, що рівні коефіцієнтів k_{2U} як для випадку базової САК, так і для випадку розробленої САК задовольняють вимогам нормативних документів. Також, при використанні розробленої САК спостерігається більше, в порівнянні з базовою САК значення $\text{tg } \varphi$ ($M(\text{tg } \varphi_p) = 0,084 > M(\text{tg } \varphi_6) = 0,010$). Але, за рахунок регулювального ефекту електричного навантаження величина активних втрат виявилась меншою на 0,85 %.

РОЗДІЛ 4

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 колаа, 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_z повин бути ≤ 4 Ом. Приймаємо $R_z = 4$ 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:

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

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:

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

4. Довжина горизонтальної смуги:

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

5. Опір цієї смуги з урахуванням екранування:

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

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

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

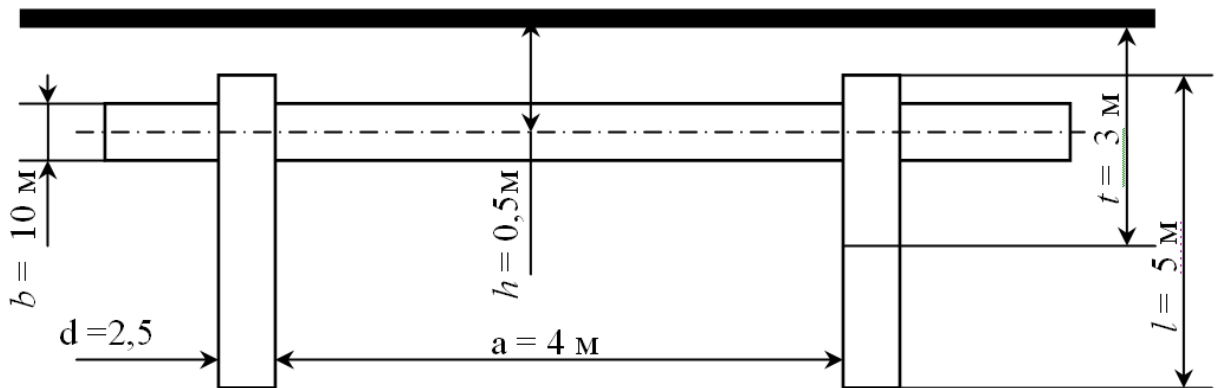


Рис. 4.1. Схема прокладання заземлення

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:

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

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

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Для оцінки ефективності використання розробленої САК параметрами режиму РЕМ у порівнянні з базовою САК потрібно провести розрахунок відповідних економічних показників.

Розрахунок економічних показників проведемо для випадку САК параметрами режиму РЕМ для мережі, принципова схема якої приведена на рис. 5.1.

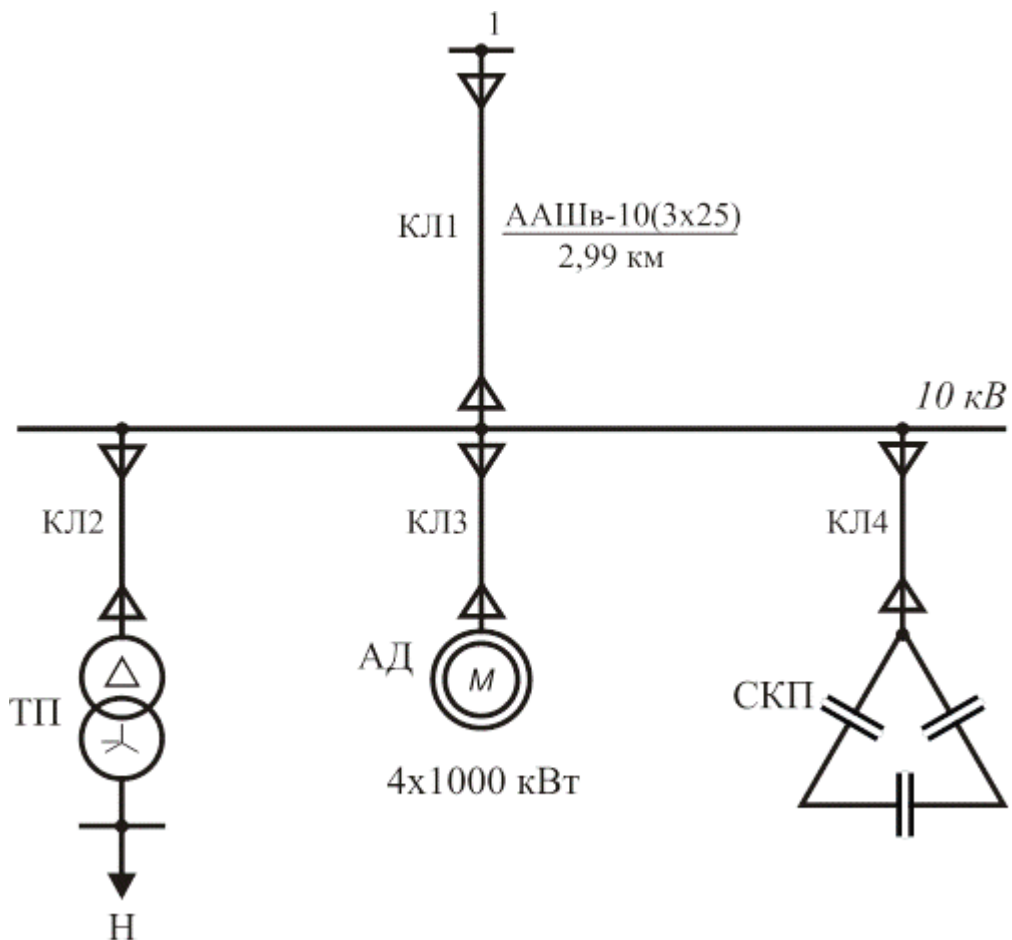


Рис. 5.1. Принципова схема РЕМ

Економічний ефект від використання розробленої в роботі САК параметрами режиму РЕМ розраховується за виразом:

$$E = Z_{\text{б}} - Z_{\text{р}}, \quad (5.1)$$

де $Z_{\text{б}}$ – приведені витрати для базового варіанту, тис. грн./рік;

$Z_{\text{р}}$ – приведені витрати для проектного варіанту, тис. грн./рік.

Приведені витрати розраховуються за формулою:

$$Z_i = E_{\text{н}} K_i + B_{\text{а.о.}i} + B_{Vi} + C_{\Delta W_i} + Z_{\text{б}i}, \quad (5.2)$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативний коеф. ефективності капіталовкладень, 1/рік;
приймається $E_{\text{н}} = 0,15$;

K_i – капіталовкладення в i -й розрахунковий варіант;

$B_{\text{а.о.}i}$ – витрати на обслуговування і амортизацію обладнання для i -го розрахункового вар., тис. грн./рік;

B_{Vi} – плата за використання реактивної енергії для i -го розрахункового варіанту, тис. грн./рік;

$Z_{\text{б}i}$ – економічний збиток від погіршення якості електроенергії.

$C_{\Delta W_i}$ – вартість втрат активної електричної, які виникають в КЛ1 (рис. 5.1) для i -го розрахункового варіанту, тис. грн./рік;

Величина строку окупності розраховується за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{E}. \quad (5.3)$$

Так як відбувається модернізація існуючої системи керування, то для капіталовкладення для базової САК $K_{\text{б}} = 0$. Витрати на демонтування блоку керування базової САК включені до капіталовкладень для розробленого

варіанту. В зв'язку з цим витрати на амортизацію та обслуговування для обох варіантів САК можна вважати однаковими $B_{a.o.i} = 0$.

При проведенні розрахунків плати за спожиту реактивну енергію і вартості втрат активної електричної енергії були прийняті наступні припущення:

1. Графік роботи підприємства, електроспоживачі якого отримують живлення від шин 10 кВ (рис. 5.1) для зимового і літнього періоду є однаковим.

2. Межа балансової належності – це точка 1 на схемі (рис. 5.1).

3. Промислове підприємство працює в 3 зміни без вихідних.

Враховуючи зазначені припущення, плата за спожиту реактивну енергію розраховується за виразом:

$$П_{Vi} = V_i^{\text{доб}} C_0 D n_p \cdot 10^{-3} \text{ тис. грн./рік}, \quad (5.4)$$

де $V_i^{\text{доб}}$ – обсяг добового споживання реактивної енергії, квар·год.

D – економічний еквівалент реактивної потужності;
 $D = 0,0365 \text{ кВт/квар};$

C_0 – тариф на електроенергію; $C_0 = 1,825 \text{ грн./кВт} \cdot \text{год}$ грн./кВт·год;

n_p – кількість робочих діб на рік; $n_p = 365$.

Добове споживання реактивної енергії можна отримати з результатів комп'ютерного моделювання для відповідної САК.

При використанні базової САК плата за споживання реактивної енергії становить:

$$П_{V1} = V_1^{\text{доб}} C_0 D n_p \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 1,825 \cdot 0,0365 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 0,04 \text{ тис. грн./рік},$$

При використанні розробленої САК плата за споживання реактивної енергії становить:

$$P_{V2} = V_2^{\text{доб}} C_0 D n_p \cdot 10^{-3} = 2873,4 \cdot 1,825 \cdot 0,0365 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 68,14 \text{ тис. грн./рік}$$

Вартість втрат електроенергії доцільно визначити лише для КЛІ зважаючи на її досить значну протяжність. Величину добових втрат $\Delta W_i^{\text{доб}}$ в КЛІ також можна визначити із результатів моделювання для відповідного варіанту САК параметрами режиму РЕМ.

Вартість втрат активної енергії визначається за виразом:

$$C_{\Delta W_i} = \Delta W_i^{\text{доб}} C_0 n_p \cdot 10^{-3} \text{ тис. грн./рік} \quad (5.5)$$

Вартість втрат електроенергії в КЛІ для базової САК:

$$C_{\Delta W_1} = \Delta W_1^{\text{доб}} C_0 n_p \cdot 10^{-3} = 1677,7 \cdot 1,825 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 1117,56 \text{ тис. грн./рік}$$

Вартість втрат електроенергії в КЛІ для розробленої САК:

$$C_{\Delta W_2} = \Delta W_2^{\text{доб}} C_0 n_p \cdot 10^{-3} = 1663,5 \cdot 1,825 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 1108,10 \text{ тис. грн./рік}$$

Для розрахунку економічних збитків від відхилення напруги скористаємося методикою, описаною в роботі [63].

Щорічний економічний збиток від відхилення напруги визначаються за виразом:

$$Зб_{\text{річн}} = Зб_{\text{ем}} + Зб_{\text{т}}, \quad (5.6)$$

де $Зб_{\text{річн}}$ – загальний щорічний економічний збиток від відхилення напруги;

$Зб_{\text{т}}$ – технологічна складова економічного збитку;

$Зб_{\text{ем}}$ – електромагнітна складова економічного збитку;

Враховуючи, що усталене відхилення напруги є стохастичною величиною, розрахунок електромагнітної і технологічної складових економічних збитків необхідно проводити із врахуванням закону розподілу.

На рисунку 5.2 показані гістограми розподілу ймовірностей ΔU_1 для базової і розробленої САК, отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

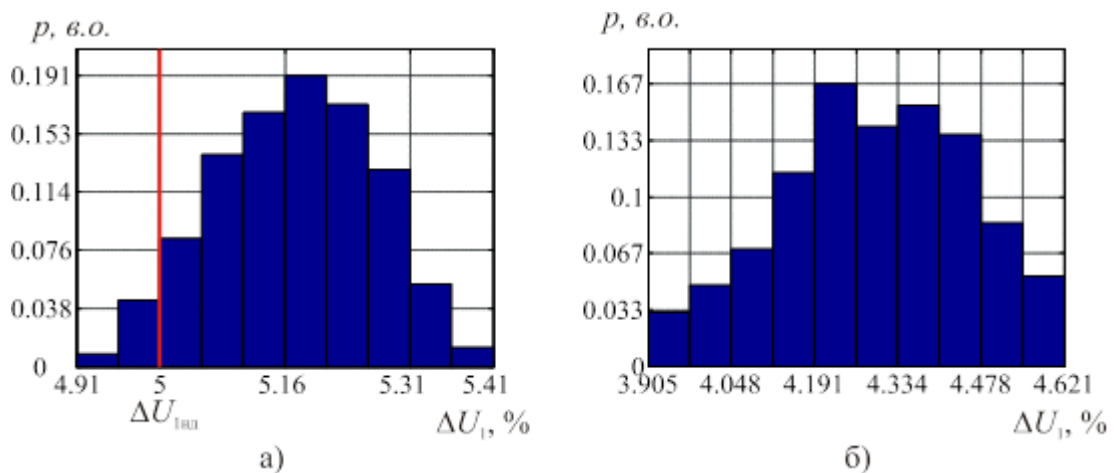


Рис. 5.2. Гістограми розподілу ймовірностей ΔU_1 для розробленої (б) та базової (а) САК

Розіб'ємо все поле значень відхилень напруги ΔU_1 на m інтервалів та визначимо ймовірності потрапляння в кожен із цих інтервалів p_i , $i = 1, 2, \dots, m$ (приймаємо $m = 10$). Припустимо, що збиток при зміні значення відхилення напруги ΔU_1 всередині кожного інтервалу є постійним і дорівнює $3\sigma_i$.

Зважаючи на ці припущення, кількість годин t_i , протягом яких спостерігається значення ΔU_{1i} для кожного з інтервалів розраховується за формулою:

$$t_i = p_i \cdot 8760, \quad (5.7)$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Дані для визначення економічних збитків від ΔU_1

Параметр	№ інтервалу									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Базова САК										
ΔU_1	4,93	4,98	5,03	5,08	5,13	5,18	5,23	5,28	5,34	5,39
$p_i \cdot 10^{-3}$, в.о.	8	44	84	139	167	191	172	129	54	12
t_i , год.	73,0	381,0	737,0	1219,0	1460,0	1671,0	1503,0	1131,0	474,0	111,0
Розроблена САК										
ΔU_1	3,94	4,01	4,08	4,15	4,22	4,30	4,37	4,44	4,51	4,58
$p_i \cdot 10^{-3}$, в.о.	32	48	69	114	167	142	154	137	85	53
t_i , год.	277,0	418,0	606,0	1000,0	1460,0	1241,0	1350,0	1197,0	744,0	467,0

Значення сумарного річного економічного збитку від ΔU_1 визначається за формулою:

$$3\delta_{\Delta U} = \sum_{i=1}^m (3\delta_{\text{емі}} + 3\delta_{\text{ті}}), \quad (5.8)$$

де $3\delta_{\text{емі}}$ – електромагнітна складова економічного збитку від ΔU_{1i} ;

$3\delta_{\text{ті}}$ – технологічна складова збитку від ΔU_{1i} .

В якості прикладу проведемо розрахунок технологічної та електромагнітної складових збитку для базової САК при $\Delta U_{1i} = 4,932 \%$.

Проведемо розрахунок електромагнітної складової збитку в електродвигунах.

Сумарна номінальна активна потужність двигунів складає:

$$P_{\text{АД}} = n_{\text{АД}} \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = 4 \cdot \frac{1000}{0,92} = 4347,82 \text{ кВт}$$

Номінальні втрати потужності в двигунах становлять:

$$\Delta P_{\text{АД}} = P_{\text{АД}} \frac{1-\eta}{\eta} = 4347,82 \cdot \frac{1-0,92}{0,92} = 378,07 \text{ кВт}$$

Втрати холостого ходу і навантажувальні втрати двигунів:

$$\Delta P_{\text{хх}} = \frac{1}{3} \Delta P_{\text{АД}} = \frac{1}{3} 378,07 = 126,02 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{нав}} = \frac{2}{3} \Delta P_{\text{АД}} = \frac{2}{3} 378,07 = 252,05 \text{ кВт}$$

Втрати активної потужності в електродвигунах при номінальній напрузі:

$$\Delta P_{U_{\text{ном}}} = \Delta P_{\text{хх}} + \Delta P_{\text{нав}} k_3^2 = 126,02 + 252,05 \cdot 0,6^2 = 216,76 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт зміни напруги становить:

$$k_{\text{н}} = 1 + \frac{\Delta U_{1i}}{100} = 1 + \frac{4,932}{100} = 1,049$$

Втрати активної потужності в електродвигунах при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$\Delta P_{\Delta U} = \Delta P_{\text{хх}} k_{\text{н}}^2 + \frac{\Delta P_{\text{нав}} k_3^2}{k_{\text{н}}^2} = 126,02 \cdot 1,049^2 + \frac{252,05 \cdot 0,6^2}{1,049^2} = 221,17 \text{ кВт}$$

Додаткові втрати активної потужності в електродвигунах при відхиленні напруги $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$\Delta P_U = \Delta P_{\Delta U} - \Delta P_{U_{ном}} = 221,17 - 216,76 = 4,41 \text{ кВт}$$

Річний збиток від додаткових втрат потужності в електродвигунах при відхиленні напруги $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$Y_{\Delta P} = \Delta P_U t_i C_0 \cdot 10^{-3} = 4,41 \cdot 73 \cdot 1,825 \cdot 10^{-3} = 0,587 \text{ тис. грн./рік}$$

Проведемо розрахунок електромагнітної складової збитку від зміни споживання РП двигунами.

Сумарна номінальна РП двигунів:

$$Q_{АД} = P_{АД} \operatorname{tg} \varphi_{АД} = 4347,82 \cdot 0,426 = 1852,17 \text{ квар}$$

Реактивне споживання холостого ходу і додаткове споживання розсіювання:

$$Q_{хх} = \frac{1}{3} Q_{АД} = \frac{1}{3} \cdot 1852,17 = 617,39 \text{ квар}$$

$$Q_{роз} = \frac{2}{3} Q_{АД} = \frac{2}{3} \cdot 1852,17 = 1234,78 \text{ квар}$$

Споживання РП двигунами при номінальному значенні напруги:

$$Q_{U_{ном}} = Q_{хх} + Q_{роз} k_z^2 = 617,39 + 1234,78 \cdot 0,6^2 = 1061,91 \text{ квар}$$

Споживання РП двигунами при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$Q_{\Delta U} = Q_{xx} k_H^2 + \frac{Q_{\text{роз}} k_3^2}{k_H^2} = 617,39 \cdot 1,049^2 + \frac{1234,78 \cdot 0,6^2}{1,049^2} = 1083,51 \text{ квар}$$

Додаткове споживання РП в двигунах при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$Q_U = Q_{\Delta U} - Q_{\text{ном}} = 1083,51 - 1061,91 = 21,60 \text{ квар}$$

Річне значення збитку від додаткового споживання РП в двигунах при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$Y_Q = Q_U t_i C_0 D \cdot 10^{-3} = 21,60 \cdot 73 \cdot 1,825 \cdot 0,036 \cdot 10^{-3} = 0,102 \text{ тис. грн./рік}$$

Річна електромагнітна складова збитку при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$Y_{\text{ем}} = Y_{\Delta P} + Y_Q = 0,587 + 0,102 = 0,689 \text{ тис. грн./рік}$$

Технологічна складова збитку при $\Delta U_1 = 4,932 \%$:

$$\begin{aligned} Y_T &= P_{\text{Ад}} \cdot a \cdot \left(\frac{\Delta U_1}{100} + b \right)^2 t_i \cdot 10^{-3} = \\ &= 4347,83 \cdot 5,465 \cdot \left(\frac{4,932}{100} + 1,1 \cdot 10^{-4} \right)^2 \cdot 73 \cdot 10^{-3} = 4,219 \text{ тис. грн./рік} \end{aligned}$$

Сумарні річні збитки від відхилення напруги при $\Delta U_1 = 4,932 \%$ для базової САК:

$$Y_{\text{річн}} = Y_{\text{ем}} + Y_T = 0,689 + 4,219 = 4,908 \text{ тис. грн./рік}$$

Результати розрахунку збитків для інших значень ΔU_1 для базової та розробленої САК приведені в табл. 5.2 та 5.3.

Таблиця 5.2. Результати розрахунку збитків від відхилення напруги для варіанту базової САК

№ з/п	ΔU_1 , %	p_i , в.о.	t_i , год.	$Зб_{\text{т}}$, тис. грн./рік.	$Зб_{\text{ем}}$, тис. грн./рік.	$Зб_{\text{р}}$, тис. грн./рік.
1	4,93	0,01	73	4,219	0,69	4,909
2	4,98	0,04	381	22,479	3,645	26,124
3	5,03	0,08	737	44,379	7,137	51,516
4	5,09	0,14	1219	74,868	11,946	86,814
5	5,14	0,17	1460	91,477	14,481	105,958
6	5,19	0,19	1671	106,746	16,77	123,516
7	5,24	0,17	1503	97,912	15,263	113,175
8	5,29	0,13	1131	75,178	11,626	86,80
9	5,34	0,05	474	32,081	4,926	37,007
10	5,39	0,01	111	7,66	1,167	8,827
Всього				556,999	644,65	87,65

Таблиця 5.3. Результати розрахунку збитків від відхилення напруги для варіанту розробленої САК

№ з/п	ΔU_1 , %	p_i , в.о.	t_i , год.	$Зб_{\text{ем}}$, тис. грн./рік.	$Зб_{\text{т}}$, тис. грн./рік.	$Зб_{\text{р}}$, тис. грн./рік.
1	3,94	0,03	277	10,223	2,006	12,229
2	4,01	0,05	418	15,987	3,091	19,078
3	4,09	0,07	606	24,017	4,576	28,593
4	4,16	0,11	1000	41,042	7,707	48,749
5	4,23	0,17	1460	61,986	11,48	73,466
6	4,30	0,14	1241	54,499	9,955	64,454
7	4,37	0,15	1350	70,335	12,677	83,012
8	4,45	0,14	1197	56,122	9,981	66,103
9	4,52	0,09	744	36,023	6,323	42,346
10	4,59	0,05	467	23,328	4,044	27,37
Всього				71,840	393,56	465,40

Результати розрахунку показників ефективності використання САК приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Результати розрахунку показників економічної ефективності використання САК

№ з/п	Показник	Од. виміру	Базовий вар.	Проектний вар.
1	Капіталовкладення:	тис. грн.		
	- блок автоматичного керування	тис. грн.	-	13,20
2	Збитки від погіршення якості електроенергії	тис. грн./рік	644,6	465,4
3	Плата за споживання реактивної електроенергії	тис. грн./рік	0,040	68,140
4	Вартість втрат активної електроенергії	тис. грн./рік	1117,6	1108,10
5	Приведені затрати	тис. грн./рік	1762,3	1643,60
6	Економічний ефект	тис. грн./рік	118,630	
7	Срок окупності	роки	0,110	

Висновки до розділу

1. Результати проведеного техніко-економічного порівняння розробленої та базової САК показали, що очікуваний економічний ефект для розробленої САК параметрами режиму РЕМ для РЕМ, що живить 4 асинхронних двигуни потужністю 1 МВт, складає 118,6 тис. грн./ рік, а срок окупності складає 0,11 року, і виявився меншим за нормативне значення (8 років). Це свідчить про доцільність використання запропонованої в роботі САК.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконані в роботі дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Проведений аналіз відомих технічних засобів компенсації РП показав, що найбільш досконалим технічним засобом є БСК з регульовальними секціями, за допомогою яких можна здійснювати автоматичне керування параметрами режиму РЕМ.

2. Аналіз впливу БСК на значення параметрів режиму РЕМ показав, що БСК і створені на їх основі СКП дають змогу здійснювати керований мультифункціональний вплив на параметри режиму РЕМ – на рівні споживання РП, рівні усталеного відхилення і несиметрії напруг.

3. Результати проведеного аналізу методів і технічних засобів автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з допомогою СКП показали, що вони не в досить повній мірі враховують мультифункціональний вплив СКП на параметри режиму РЕМ, що спричиняє недостатню ефективність автоматичного керування параметрами режиму РЕМ з СКП за умов наявності несиметрії напруг мережі через неврахування впливу СКП на рівні відхилення напруги. Необхідність врахування зазначеної можливості потребує проведення досліджень з питання автоматизації керування параметрами режиму РЕМ з СКП.

4. Формалізація задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ в умовах несиметрії напруг показала, що задача автоматичного керування режимом зводиться до задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації.

5. В результаті аналізу залежностей між вхідними і вихідними параметрами об'єктів керування визначено кількість і вигляд критеріальних виразів задачі багатокритеріальної оптимізації.

6. В результаті проведеного вибору і обґрунтування методу вирішення задачі автоматичного керування параметрами режиму РЕМ як задачі

багатокритеріальної оптимізації встановлено, що найдоцільнішим методом вирішення цієї задачі є метод наближення до утопічної точки.

7. Проведений аналіз числових методів оптимізації функції декількох змінних показав, що для задачі оптимізації, яка розглядається в роботі, найбільш доцільно використати метод Нелдера-Міда, якому притаманні висока надійність, швидкодію, та відносна простота реалізації.

8. Створені на основі знайдених розв'язків задачі керування структурна схема САК і алгоритм розрахунку оптимального вектора керування дали змогу розробити комп'ютерні моделі, з допомогою яких було проведено аналіз роботи розроблених САК параметрами режиму РЕМ.

9. Проведений аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування параметрами режиму РЕМ шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання показав, що при використанні розробленої САК рівень ΔU_1 , на відміну від базової САК, в повній мірі задовольняє вимогам чинних нормативних документів ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$).

10. Результати комп'ютерного моделювання показали, що рівні коефіцієнтів k_{2U} як для випадку базової САК, так і для випадку розробленої САК задовольняють вимогам нормативних документів. Також, при використанні розробленої САК спостерігається більше, в порівнянні з базовою САК значення $\text{tg } \varphi$ ($M(\text{tg } \varphi_p) = 0,084 > M(\text{tg } \varphi_6) = 0,010$). Але, за рахунок регулювального ефекту електричного навантаження величина активних втрат виявилась меншою на 0,85 %.

11. Результати проведеного техніко-економічного порівняння розробленої та базової САК показали, що очікуваний економічний ефект для розробленої САК параметрами режиму РЕМ для РЕМ, що живить 4 асинхронних двигуни потужністю 1 МВт, складає 118,6 тис. грн./ рік, а срок окупності складає 0,11 року, і виявився меншим за нормативне значення (8 років). Це свідчить про доцільність використання запропонованої в роботі САК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Тимофеев А. С. Компенсация реактивной мощности: Учеб. пособие./ А. С. Тимофеев; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010, – 67с.
3. Константинов Б. А., Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности / Б. А. Константинов, Г. З. Зайцев – Л., «Энергия», 1976. – 104 с.
4. Кочкин В. И., Нечаев О. П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В. И. Кочкин, О. П. Нечаев – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.
5. Жежеленко И. В. Реактивная мощность в системах электроснабжения: [учебное пособие] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – К. : УМК, 1989. – 108 с.
6. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
7. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок / В. П. Ильяшов. – М. : Энергия, 1986. – 124с.
8. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками / В. Г. Кузнецов // Электричество. – 1983. – №2. – С. 64–67. – ISSN 0013–5380.
9. 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.

10.Иткин В. Р. Компенсация реактивной мощности: [электронный ресурс] / В. Р. Иткин. // Сайт компании ЗАО «Матик электро». – Режим доступа www.matic.ru.

11.Тарчуткин А. Л. Эффективность компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А. Л. Тарчуткин // Электрик. – 2007. – №2. – С. 53 – 55.

12.Тарчуткин А. Л. Эффективность компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А. Л. Тарчуткин // Электрик. – 2007. – №3. – С. 36 – 38.

13.Тарчуткин А. Л. Эффективность компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А. Л. Тарчуткин // Электрик. – 2007. – №4. – С. 40 – 43.

14.Компенсация реактивной мощности в электросетях предприятий: [электронный ресурс] // Сайт компании Диал Альфа. – Режим доступа: compensation.com.ua.

15.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.

16.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.

17.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.

18.Аввакумов В. Г. Энергетические параметры трехфазной несимметричной конденсаторной установки при несимметричных напряжениях / В.Г. Авакумов. // Изв. вузов. Энергетика. – 1960. – №11. – С. 3–12.

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

20. Данцис Я. Б. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников / Я. Б. Данцис, Г. М. Жилов. – Л. : Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 176 с.

21. Баркан Я. Д. Автоматическое управления режимом батарей конденсаторов / Я. Д. Баркан. – М.: Энергия, 1980. – 165с.

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

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

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

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28.Гриб О. Г. Ймовірність розподілу відхилення напруги в електричних мережах зовнішнього освітлення / О. Г. Гриб, О. М. Довгальок, О. В. Саприка // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4(63). Частина 1 – С. 94 – 97. – ISSN 1995–0519.

29.Шидловский А. К. Анализ и синтез схем симметрирования / А. К. Шидловский, И. В. Мостовяк. – К., 1973. – 66 с.

30.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.

31.Терешкевич Л. Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / Л. Б. Терешкевич, М. І. Цибульський // Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 65–67. – ISSN 0204–3599.

32.Суднова В. В. Качество электрической энергии / В. В. Суднова. – М: Тест-электро, 2000. – 240 с.

33.Гриб О. Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения: Уч. пособие / О. Г. Гриб. – Харьков: ХНАГХ, 2004. – 180 с.

34.Червінська Т.М. Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою / Л. Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №3(62) Частина 1. – С. 161 – 164.

35.Червінська Т.М. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Терешкевич Л. Б., Червінська Т.М., Кузьменко М.В. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Выпуск 32. – 2010.

36.Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник ВПІ. – 2007. – 2005. – № 6. – с. 76 – 79.

37.Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

38.Нетушил А. В. Теория автоматического управления: нелинейные системы, управление при случайных воздействиях: [учебник для вузов] / А. В. Нетушил, А.В. Балтрушевич, В.В. Бурляев. – М.: Высш. школа, 1983 – 432 с.

39.Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растринин. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.

40.Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации / Ю. К. Машунин. – М.: Наука, 1986. – 141 с.

41.Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

42.Аввакумов В. Г. Об одной лексикографической задаче многоцелевой оптимизации качества электроэнергии / В. Г. Аввакумов, А. М. Волоцкий // Изв. ВУЗов Энергетика. – 1977. – № 7. – С. 8–12.

43.Зорин В. В. Об одном правиле предпочтения частных целей в задачах многоцелевой оптимизации качества электроэнергии / В. В. Зорин, А. М. Волоцкий // Электрические сети и системы. Республиканский межведомственный науч.-техн. Сб. – 1987. – Вып. 23. – С. 43–46.

44.Токарев В. В. Методы оптимальных решений. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность / В. В. Токарев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 420 с.

45.Гороховик В. В. Выпуклые и негладкие задачи векторной оптимизации / В. В. Гороховик. – Мн.: Навука і тэхніка, 1990. – 239 с.