

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної
потужності в електричних мережах промислових підприємств

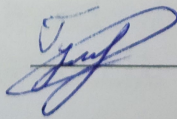
Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕМ-23м

Освітня програма: «Енергетичний
менеджмент»

(назва ОП)

спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)



Гуменного В.О.

(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту

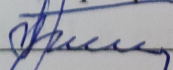
Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

«16» 2 грудня 2024 р.

д.т.н., професор каф. ЕСЕЕМ



Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

«16» 2 грудня 2024 р.

Опонент:

К.т.н., доц. факультету ЕСС.

(прізвище та ініціали)

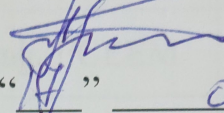
«19» 12 2024 р.

Винишевський С.Я.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕМ

 проф. М. Й. Бурбело
“17” 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Гуменному Владиславу Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств

керівник роботи Бурбело Михайло Йосипович д.т.н., проф. каф. ЕСЕМ

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” 09 2024 року № 310

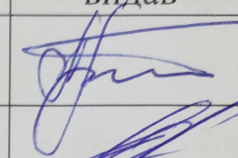
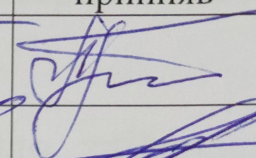
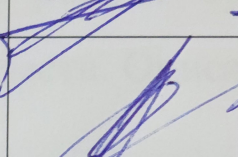
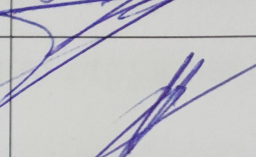
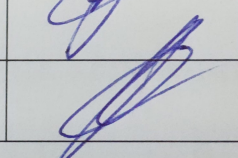
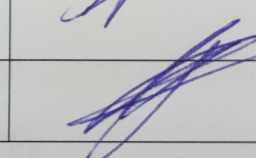
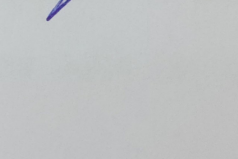
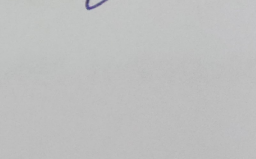
2. Термін подання студентом роботи “10” 12 2024 року

3. Вихідні дані до роботи відомості про пристрої автоматичного керування конденсаторними установками, вольт-амперна характеристика СТК, патент на пристрій безперервного регулювання РП.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Характеристика КРП в електричних мережах промислових підприємств. Дослідження методів керування пристроями КРП. Моделювання роботи пристроїв СТК. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно параметрів
електричної мережі. Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП
відносно організації процесу керування і способах контролю за роботою КРП.
Забезпечення безперервного регулювання РП. Модель СТК в MATLAB
Simulink. Результати моделювання основних режимів роботи СТК.

консультанти розділів роботи

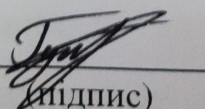
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Бурбело М.Й., д.т.н., проф., каф. ЕСЕМ		
Економічна частина	Шулє Ю.А., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Войтюк Ю.П., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Нормконтроль	Войтюк Ю.П., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		

Дата видачі завдання 17.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

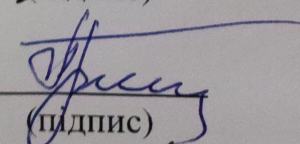
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз електричних мереж промислових підприємств	30.09.24	
2	Аналіз пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств	10.10.24	
3	Науково дослідна частина	25.10.24	
4	Синтез результатів наукової роботи	22.11.24	
5	Економічна частина	29.11.24	
6	Охорона праці	01.12.24	
7	Графічна частина	04.12.24	

Студент


(підпис)

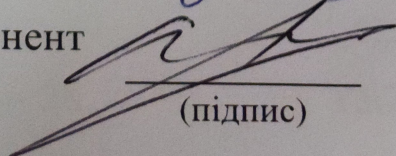
Гуменний В.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник магістерської
дипломної роботи


(підпис)

Бурбело М.Й.
(прізвище та ініціали)

Опонент


(підпис)

Вичневський С.Я.
(прізвище та ініціали)

Гуменний Владислав Олегович. Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств. МКР. Спеціальність 141 – Вінниця: ВНТУ, ФЕЕЕМ, кафедра ЕСЕЕМ, 2024 – 117 с.

У даній магістерській роботі дослідження методи керування пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств.

В першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи було здійснено загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств. Описано структуру, функції, особливості та проблеми ЕМПП.

В другому розділі проведений загальний аналіз методів керування пристроями КРП. Досліджено підходи до розробки методів керування пристроїв КРП.

Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП.

Розроблено математичну модель електричної мережі з СТК для КРП, яка дає змогу дослідити ефективність обраного методу роботи системи керування пристроєм СТК. Досліджено різні режими роботи СТК на отриманій моделі з метою налаштування цифрової системи управління при різних змінних графіках навантажень споживачів електричної енергії.

В четвертому розділі проведено аналіз стартап проекту, було продемонстровано технічну сторону питання та доцільність проекту.

П'ятий розділ присвячено питанням охорони праці та пожежної безпеки

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, система керування, електрична мережа.

ABSTRACT

Gumenny Vladislav Olegovich. Research on control methods for reactive power compensation devices in electrical networks of industrial enterprises. MTW. Specialty 141 - Vinnytsia: VNTU, FEEEM, ESEEM department, 2024 - 117 p.

This master's thesis investigates methods for controlling reactive power compensation (RPC) devices in industrial enterprise electrical networks.

In the first chapter of the master's qualification work, a general analysis of industrial enterprise electrical networks was conducted. The structure, functions, features, and issues of these networks were described.

The second chapter presents a general analysis of methods for controlling RPC devices. Approaches to developing control methods for RPC devices were explored. A control method for a capacitor bank device (CBD) was proposed to ensure smooth (continuous) reactive power regulation.

A mathematical model of an electrical network with a static VAR compensator (SVC) for RPC was developed, enabling the study of the efficiency of the selected control system method for the SVC device. Various SVC operating modes were analyzed using the developed model to configure the digital control system under different variable load schedules of electricity consumers.

In the fourth chapter, a startup project analysis was carried out, demonstrating the technical aspects and feasibility of the project.

The fifth chapter is dedicated to occupational safety and fire protection issues.

Keywords: reactive power compensation, control system, electrical network.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА КРП В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	9
1.1 Загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств	9
1.2 Загальний аналіз пристроїв КРП в ЕМПП.....	15
1.3 Релейний захист та автоматика пристроїв КРП.....	21
1.4 Висновки до розділу 1.....	24
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КРП.....	25
2.1 Загальний аналіз методів керування пристроями КРП	25
2.2 Математичні моделі методів керування пристроями КРП	30
2.3 Метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного регулювання	31
2.4 Методи керування пристроями СТК.....	36
2.5 Система керування СТК компанії АВВ	37
2.6 Компенсація реактивної потужності при мінімумі втрат активної.....	38
2.7 Алгоритми оптимального керування потужностями КУ	40
2.8 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом мінімуму втрат мереж окремого дерева.....	42
2.9 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом прогнозованого максимуму зниження втрат.....	45
2.10 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом максимуму зниження втрат для мереж з живлячою КЛ .	48
2.11 Висновки по розділу 2	54
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ СТК.....	56
3.1 Аналіз методу керування СТК.....	56
3.2 Цифрова модель для керування пристроєм СТК.....	58
3.3 Моделювання основних режимів роботи СТК.....	62
3.4 Висновки по розділу 3	65
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	66
4.1 Вступ.....	66

4.2 Оцінка ефективності КРП.....	66
4.3 Опис ідеї	70
4.4 Технологічний аудит ідеї проекту	71
4.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	72
4.6 Розроблення ринкової стратегії стартап проекту.....	74
4.7 Розроблення маркетингової програми стартап проекту	75
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	77
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	78
5.1.1 Безпека щодо організації робочих місць	78
5.1.2 Електробезпека	78
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	81
5.2.1 Мікроклімат	81
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	81
5.2.3 Виробниче освітлення.....	83
5.2.4 Виробничий шум	85
5.2.5 Виробничі вібрації.....	86
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи компенсуючих установок в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	87
5.3.1 Дослідження безпеки роботи КУ в умовах дії іонізуючих випромінювань	89
5.3.2 Дослідження безпеки роботи КУ в умовах дії електромагнітного імпульсу....	90
5.4 Розробка превентивних заходів по підвищенню безпеки роботи компенсуючих установок в надзвичайних ситуаціях	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95
Додатки.....	99
Додаток А – Технічне завдання	100
Додаток Б – Графічний матеріал	103
Додаток В – Протокол перевірки на наявність текстових запозичень	109
Додаток Г – Ілюстративний матеріал.....	111

ВСТУП

Актуальність теми. Компенсація реактивної потужності відіграє важливу роль у забезпеченні стабільної, ефективної та економічної роботи електричних мереж, оскільки вона дозволяє знижувати втрати електроенергії, підтримувати стабільний рівень напруги та зменшувати навантаження на обладнання. Це, у свою чергу, підвищує надійність системи та якість постачання електроенергії кінцевим споживачам. З огляду на це, забезпечення оптимального керування пристроями КРП стає важливим завданням. Ефективне керування пристроями КРП дозволяє мінімізувати витрати на енергопостачання, уникати штрафів за низький коефіцієнт потужності, забезпечувати високу якість електроенергії та адаптивність системи до змінного навантаження [1, 2].

Оптимальне функціонування пристроїв КРП досягається шляхом вибору типу, потужності та методів керування пристроями КРП, які враховуються особливості електричної мережі місця їх під'єднання та режимів роботи.

Дослідження методів керування пристроїв КРП є актуальною темою. Рішення проблем в даній тематиці дозволяє досягти оптимальної роботи електричних мереж промислових підприємств шляхом ефективнішої роботи пристроїв КРП.

Мета і задачі дослідження. Метою даної магістерської роботи є дослідження методів керування пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств для досягнення оптимальної роботи даних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети роботи потрібно вирішити такі задачі:

- провести загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств їх властивостей та особливостей;
- дослідити найбільш розповсюджені пристрої КРП в електричних мережах промислових підприємств та ефект від їх використання;
- дослідити методи керування пристроїв КРП, які дають змогу досягти оптимальну ефективність роботи цих пристроїв;
- здійснити моделювання основних режимів роботи автоматично керованого пристрою КРП.

Об'єкт дослідження – Електричні мережі промислових підприємств.

Предмет дослідження – Компенсація реактивної потужності.

Методи досліджень. У магістерській кваліфікаційній роботі використовуються загальноприйняті методи розрахунку електричних мереж.

Наукова новизна:

1. Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП. Запропонований метод КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання РП.

2. Розроблено математичну модель електричної мережі з СТК для КРП, яка дає змогу дослідити ефективність обраного методу роботи системи керування пристроєм СТК. Здійснено моделювання основних режимів роботи пристрою СТК в електричній мережі для досягнення оптимальної КРП.

Практична цінність. Розроблена математична модель електричної мережі з СТК на базі цифрової системи керування пристроєм КРП може бути використана організаціями, що займаються розробкою джерел стабілізованої реактивної потужності, для дослідження їх характеристик.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Для роботи висунуто основні теоретичні положення, які були обговорені на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників та студентів університету при участі працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних підприємств.

Публікації: За результатами досліджень опубліковано тези доповідей [40].

1 ХАРАКТЕРИСТИКА КРП В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств

Електричні мережі промислових підприємств (ЕМПП) – це сукупність електротехнічного обладнання, ліній передачі, систем трансформації, систем захисту та систем керування, призначених для забезпечення електропостачання промислових об'єктів. Вони відповідають за доставку електроенергії від джерел живлення до споживачів на підприємстві та організацію раціонального використання споживаної електричної енергії.

Електричні мережі промислових підприємств відрізняються своєю складністю, високим рівнем енергоємності та специфічними вимогами до надійності та якості електропостачання. Для повного розуміння роботи ЕМПП необхідно враховувати наступні ключові аспекти їх функціонування:

1. Структура електричних мереж промислових підприємств.

Електричні мережі на промислових підприємствах поділяються на:

- зовнішні мережі: забезпечують підключення підприємства до джерел електроенергії (державна енергосистема чи локальні генератори);
- внутрішні мережі: постачають електроенергію до окремих цехів, ділянок чи обладнання.

Рівні напруги рисунок 1.1:

- висока напруга (110–220 кВ) для підключення до магістральних мереж;
- середня напруга (6–35 кВ) для розподілу енергії на об'єкті;
- низька напруга (0,4–0,6 кВ) для живлення кінцевого обладнання.

2. Особливості енергоспоживання промислових підприємств:

- нестабільне навантаження: різкі зміни в споживанні через запуск/зупинку потужного обладнання;
- висока частка реактивної потужності: обумовлена використанням асинхронних двигунів, трансформаторів і печей індукційного типу;

- вимоги до надійності: відсутність електропостачання може призвести до значних фінансових втрат чи пошкодження обладнання;
- чутливість до якості електроенергії: коливання напруги чи частоти можуть впливати на технологічні процеси.

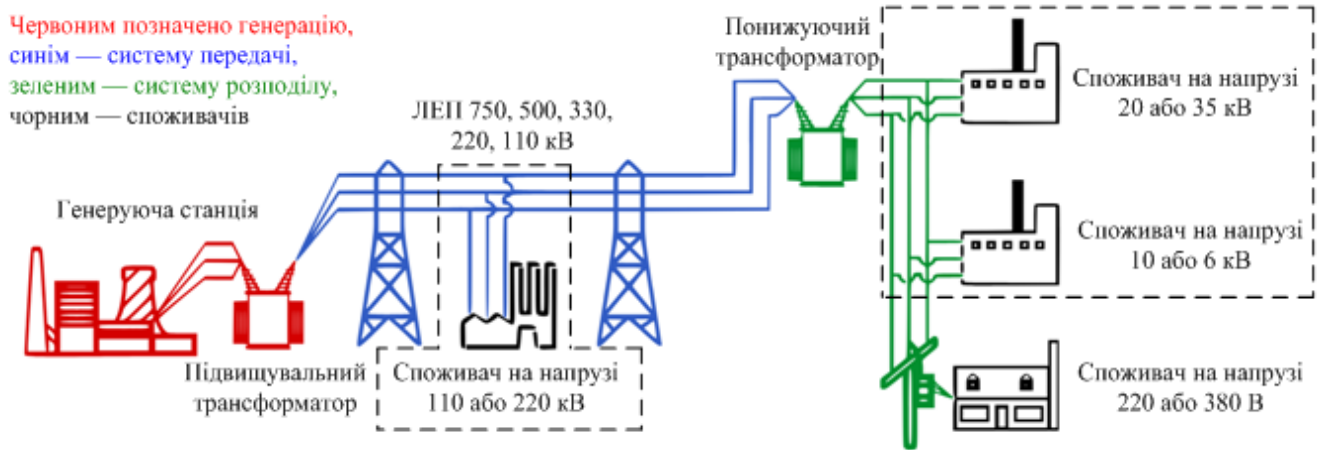


Рисунок 1.1 – Спрощена схема електричної мережі

3. Проблеми електричних мереж промислових підприємств.

Втрати енергії:

- активні втрати в кабельних і повітряних лініях;
- реактивні втрати через низький коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$);
- нерівномірність навантаження фаз: спричиняє несиметрію струмів і додаткові втрати;
- коливання напруги та частоти: викликають зниження ефективності обладнання;
- недостатність компенсації реактивної потужності: підвищує плату за спожиту електроенергію та перевантажує мережу;
- застарілі системи керування: обмежують можливості адаптації мережі до сучасних умов;

4. Методи вдосконалення електромереж промислових підприємств

Оптимізація розподілу навантаження:

- використання програмно-апаратних засобів для моніторингу енергоспоживання;
- перерозподіл навантаження між фазами;

- впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності;
- застосування сучасних систем автоматизації;
- реконструкція та модернізація обладнання:

1. Заміна старих трансформаторів на енергоефективні моделі;
2. Використання сучасних кабелів із низькими втратами;
3. Впровадження джерел резервного живлення.

Основні елементи електричних мереж промислових підприємств рисунок 1.2:

1. Джерела живлення. Підключення до магістральних електричних мереж (високовольтні підстанції). Локальні генератори (дизельні, газотурбінні установки, відновлювані джерела енергії);
2. Розподільчі підстанції. Понижують напругу до рівня, необхідного для внутрішніх мереж. Забезпечують розподіл енергії між окремими цехами чи ділянками;
3. Лінії передачі. Кабельні та повітряні лінії, які передають електроенергію;
4. Електротехнічне обладнання. Трансформатори для зміни рівнів напруги. Конденсаторні установки для компенсації реактивної потужності;
5. Захисні пристрої (реле, автоматичні вимикачі).

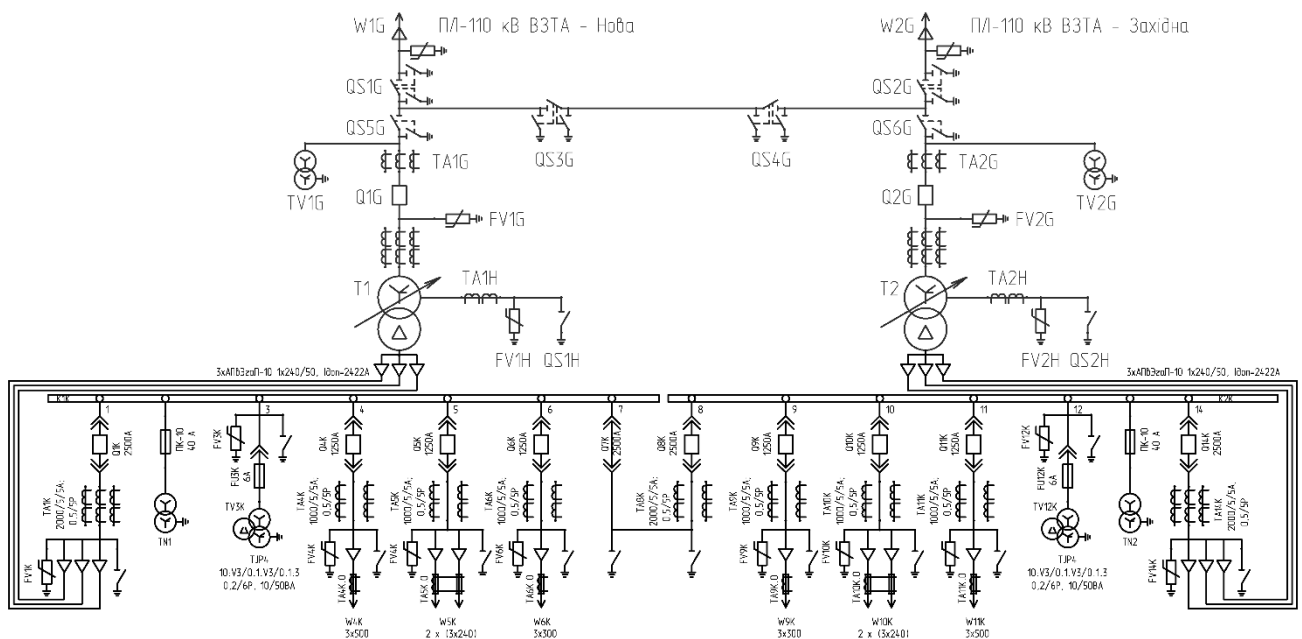


Рисунок 1.2 – Схема головних з'єднань ГПП підприємства

Функції електричних мереж промислових підприємств

- постачання електроенергії. Забезпечення живленням виробничого обладнання, освітлення, вентиляції тощо.
- розподіл енергії. Доставка електроенергії до всіх точок споживання на підприємстві;
- компенсація реактивної потужності. Зменшення навантаження на мережу та покращення коефіцієнта потужності;
- захист і надійність. Забезпечення безперервності живлення. Запобігання аваріям та пошкодженню обладнання.

Електричні мережі промислових підприємств є ключовим елементом інфраструктури, що забезпечує роботу всього виробничого процесу. Їхній стан і ефективність значно впливають на продуктивність підприємства, витрати на електроенергію та надійність роботи обладнання.

Компенсація реактивної потужності (КРП) – являє собою цілеспрямовану дію на баланс реактивної потужності для окремого вузла електричної мережі [5,6].

КРП доцільно здійснювати пристроями FACTS.

Керована система передачі змінного струму також гнучка система передачі змінного струму (англ. Flexible alternating current transmission system, FACTS [7]) - це система, яка використовується для передачі змінного струму, як правило, в таких системах застосовується силова електроніка.

Класифікація пристроїв FACTS наведена малюнку 1.3 [7].



Рисунок 1.3 – Пристрої FACTS та їх ієрархія

Пристрої FACTS за принципом дії поділяються на:

1. Статичні – пристрої FACTS, які не мають рухливих елементів. До цього типу пристроїв відносяться:

БСК – батареї статичних конденсаторів;

ШР - шунтуючі реактори, що забезпечують ступінчасте регулювання реактивної потужності;

ППК - пристрої поздовжньої компенсації;

ВРГ - реакторні групи, що комутуються вакуумними вимикачами;

КШР - керовані шунтуючі реактори;

СТК – статичні тиристорні компенсатори, являються динамічним компенсаторами РП;

СТАТКОМ – статичні компенсатори реактивної потужності, виконані з урахуванням сучасної силової електроніки [8].

2. Електромашинні – пристрої FACTS, основу яких лежать електричні машини. До цього типу пристроїв відносяться:

СК – синхронні компенсатори;

АСК – асинхронізовані компенсатори.

Використання пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств забезпечує покращення низки показників, що позитивно впливає на роботу та економічність.

Застосування пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств дозволяє досягти:

1. Покращення коефіцієнта потужності. КРП підвищують коефіцієнт потужності, зменшуючи споживану реактивну потужність, яку споживають електродвигуни, трансформатори та інші навантаження для створення електромагнітного поля. Це дозволяє знизити потужність, що передається по мережі, та зменшити струмові навантаження на лінії.

2. Зниження втрат потужності та енергії. Зменшення реактивної складової струму призводить до зниження втрат потужності на нагрівання проводів і

трансформаторів. Це особливо актуально для довгих ліній електропередачі, де високі втрати можуть значно знижувати ефективність енергопередачі.

Втрати потужності в електричній мережі визначаються за виразом [9]:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_E}{U} \right)^2 + \left(\frac{Q_E}{U} \right)^2 \right] \cdot R_E = \Delta P_a + \Delta P_p. \quad (1.1)$$

де ΔP_a - втрати активної потужності;

ΔP_p - втрати реактивної потужності;

R_E - еквівалентний активний опір мережі;

P_E, Q_E, U - параметри режиму.

3. Підвищення пропускної здатності мережі. За рахунок зниження струмового навантаження, використання пристроїв КРП дозволяє збільшити кількість активної потужності, що може передаватися по мережі. Це дає можливість обслуговувати більше навантаження без необхідності заміни проводів чи трансформаторів.

4. Стабілізація напруги. Пристрої КРП допомагають підтримувати стабільний рівень напруги на різних ділянках мережі, особливо під час пікових навантажень [11]. Це підвищує надійність електропостачання для споживачів, знижує ризик просадок напруги та забезпечує стабільну роботу обладнання.

5. Подовження терміну служби обладнання. Зменшення струмових навантажень і нагріву проводів сприяє зниженню зношування обладнання. Трансформатори, кабелі та інше обладнання працюють у більш сприятливих умовах, що збільшує їхній термін служби.

6. Економія коштів. Зменшення втрат і підвищення ефективності використання мережі веде до скорочення витрат на компенсацію втрат, обслуговування обладнання та оплати електроенергії. Поліпшення коефіцієнта потужності також знижує штрафи за низький коефіцієнт потужності [10].

В цілому використання пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств сприяє підвищенню надійності, якості електроенергії, та економічності електричних мереж. Тому дослідження найбільш ефективних методів керування пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств є актуальною задачею.

1.2 Загальний аналіз пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств

Пристрої КРП в електричних мережах промислових підприємств призначені для зниження реактивних втрат енергії та підвищення ефективності роботи цих електричних мереж.

Самими розповсюдженими пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств є:

- батареї статичних конденсаторів (БСК);
- автоматизовані установки компенсації реактивної потужності (АКРП);
- статичні тиристорні компенсатори (СТК для великих енергетичних системи, системи транспорту електроенергії);
- синхронні компенсатори (СТАТКОМ, для високовольтних мереж, промислових об'єктів, інтеграція відновлюваних джерел енергії в мережу);
- синхронні компенсатори.

Батареї статичних конденсаторів – це пристрої, що складаються з кількох конденсаторів [8], з'єднаних у батарею для забезпечення компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Батареї статичних конденсаторів є одним із найпоширеніших пристроїв компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств завдяки простоті конструкції, низькій вартості та ефективності. Вони складаються з паралельно з'єднаних конденсаторів, які забезпечують підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$), зниження втрат електроенергії та розвантаження мережі. Основні переваги таких пристроїв включають швидке встановлення, невибагливість до обслуговування та можливість роботи зі стабільними навантаженнями.

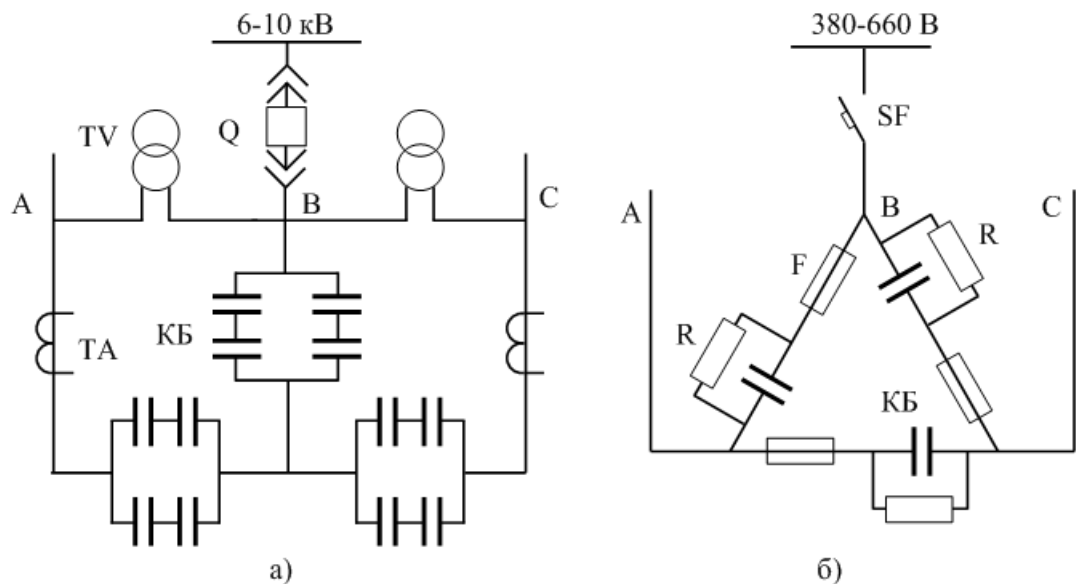


Рисунок 1.4 – Принципова схема однієї трифазної секції КУ: а) для мережі 6-10 кВ; б) для мережі 380-660 В

Основні особливості БСК [1]:

На відміну від регульованих пристроїв, статичні конденсатори не змінюють свій стан в залежності від коливань навантаження. Вони забезпечують постійну компенсацію реактивної потужності.

Простота конструкції та низька вартість – у порівнянні з іншими пристроями КРП, конденсаторні батареї мають просту конструкцію, легкі в обслуговуванні та доступні за ціною.

Конструкція батарей статичних конденсаторів:

Батареї статичних конденсаторів можуть складатися з окремих конденсаторних блоків, об'єднаних в одну систему. Кожен блок містить певну кількість конденсаторів, які можна підключати паралельно чи послідовно, щоб забезпечити необхідний рівень потужності. Батареї можуть бути стаціонарними або модульними, що дозволяє змінювати їх конфігурацію залежно від потреб мережі.

Принцип роботи. Конденсаторна батарея підключається паралельно до електричної мережі, зменшуючи потребу в реактивній потужності. Вона працює, генеруючи реактивну потужність протилежного знаку до реактивної потужності споживачів, тим самим компенсуючи її. Це знижує навантаження на генератори, трансформатори та лінії передачі.

Статичні тиристорні компенсатори являються пристроями для регулювання реактивної потужності в електричних мережах. Вони належать до сімейства гнучких систем передачі змінного струму (FACTS) і використовуються для підтримки стабільної напруги, підвищення енергоефективності та зменшення втрат електроенергії. Основна функція СТК – компенсувати реактивну потужність, знижуючи навантаження на мережу.

На рисунку 1.5 показано типовий пристрій СТК [12].

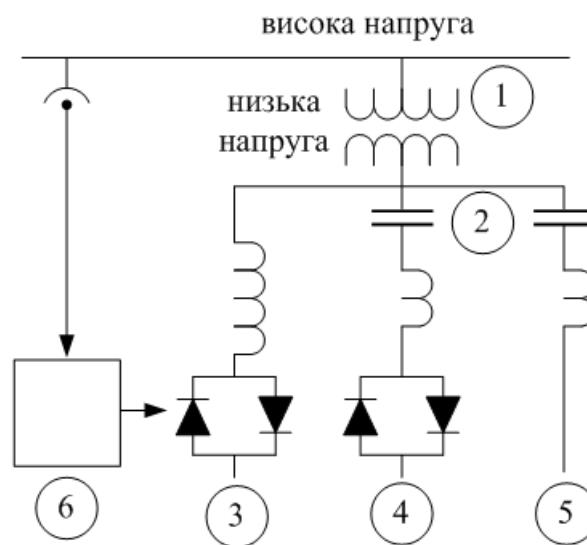


Рисунок 1.5 – Під'єднання СТК

Позначення на рисунку 1.5: 1 - понижуючий трансформатор; 2 - шина низької напруги; 3 - реактор із тиристорним керуванням; 4- конденсатор із тиристорною комутацією; 5 – ланцюг фіксованого фільтра; 6 – блок керування.

Основні компоненти СТК:

Тиристори – напівпровідникові прилади, що керують потоком реактивної потужності.

Конденсатори та реактори – створюють реактивну потужність для компенсації, яку регулюють тиристори.

Система керування – контролює роботу тиристорів, забезпечуючи динамічне регулювання потужності відповідно до змін навантаження.

Переваги СТК:

Швидке регулювання реактивної потужності, що забезпечує стабільність напруги.

Зменшення втрат енергії в мережі.

Покращення якості електроенергії за рахунок зниження коливань напруги.

Збільшення пропускної здатності ліній передачі завдяки компенсації реактивної потужності.

Вольт-амперна характеристика СТК має нахил, який визначається заданими умовами точності підтримки напруги і наявною потужністю компенсатора рисунок 1.6 [8].

Існує три робочі області, які визначають сталий режим роботи СТК:

1) Діапазон регулювання, в якому підтримується задана напруга в точці підключення СТК;

2) Область високої напруги - ВС. в цій області компенсатор працює в максимально індуктивному режимі, подібно до нерегульованого реактора;

3) область низької напруги - ОА. В цій області компенсатор працює в ємнісному режимі, наскільки це можливо, і подібний до нерегульованого БК. Варто зазначити, що в цьому режимі для КТК характерний від'ємний ефект регулювання напруги, притаманний БК [7].

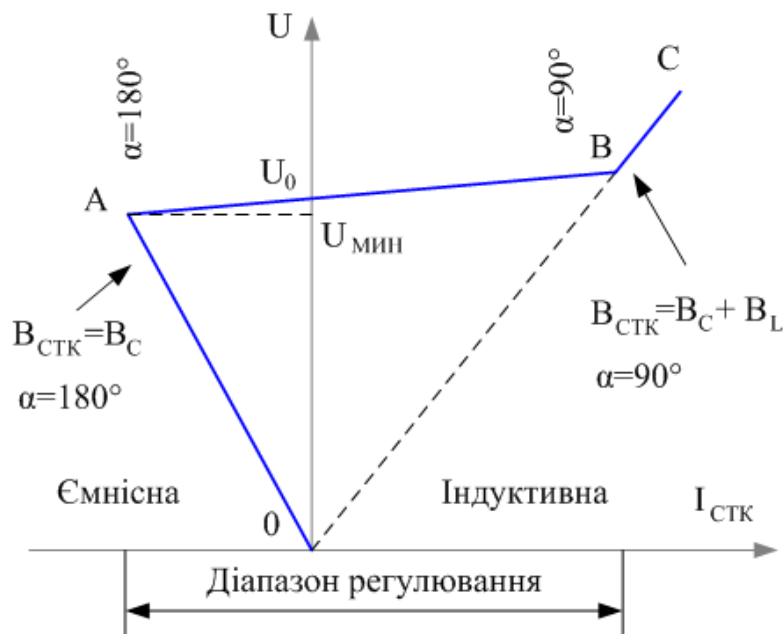


Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика СТК

Пристрої СТК є швидкими та ефективними, але вимагають значних початкових вкладень і складної системи керування.

Синхронні компенсатори – це пристрої, які використовуються для компенсації реактивної потужності в електричних мережах і для стабілізації напруги [7]. Вони представляють собою синхронні електродвигуни, що працюють у холостому режимі (без механічного навантаження), забезпечуючи регулювання реактивної потужності в залежності від потреб мережі. Синхронні компенсатори можуть як генерувати, так і споживати реактивну потужність, що робить їх особливо корисними в системах високої напруги.

Принцип роботи. Синхронний компенсатор підключається до мережі, і його збудження регулюється для досягнення бажаного рівня реактивної потужності:

Недозбудження (споживання реактивної потужності) – компенсатор споживає реактивну потужність, знижуючи напругу в мережі.

Перезбудження (генерація реактивної потужності) – компенсатор генерує реактивну потужність, підвищуючи напругу.

Цей процес є динамічним, і рівень збудження може змінюватися в режимі реального часу, забезпечуючи оптимальні параметри мережі в умовах змінного навантаження.

Можливість регулювання реактивної потужності в ланцюзі статора двигуна шляхом зміни струму його збудження показана векторними діаграмами на рис. 1.7.

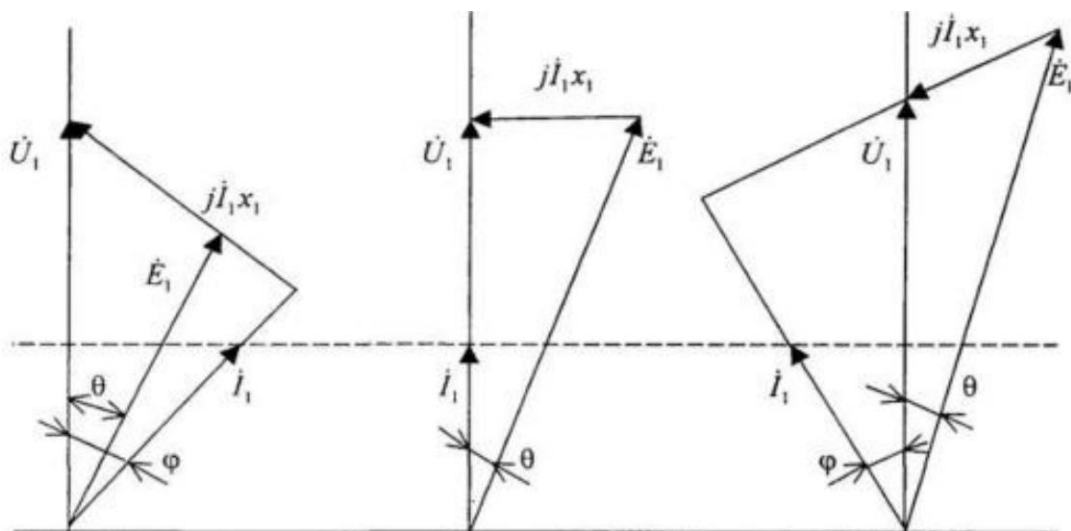


Рисунок 1.7 – Векторні діаграми синхронного двигуна при різних струмах збудження і однаковому навантаженні на валу: а - відстає $\cos\varphi$; б - $\cos\varphi = 1$; в - випереджає $\cos\varphi$

Векторна діаграма на рис. 1.7, а відповідає струму збудження менше номінального. При цьому вектор струму статора відстає від вектора напруги мережі на кут φ , тобто двигун працює з відстаючим φ (реактивна потужність «споживається»). При збільшенні струму збудження ЕРС, що наводиться в обмотках статора, збільшується і може досягти такого значення, при якому струм статора, буде збігатися по фазі з напругою тобто ($\cos\varphi = 1$) [8].

Переваги синхронних компенсаторів:

Динамічна реактивна компенсація – вони швидко реагують на зміни в навантаженні, підтримуючи стабільну напругу.

Зменшення втрат у мережі – підвищення коефіцієнта потужності знижує струми в лініях, що зменшує втрати.

Підтримка стабільності системи – синхронні компенсатори покращують стійкість мережі до коливань напруги та перепадів потужності.

Стабілізація напруги – компенсатори підвищують якість електроенергії, що особливо важливо для чутливих до коливань напруги споживачів.

Захист від провалів і сплесків напруги – компенсатори можуть поглинати надлишок потужності або забезпечувати її під час дефіциту, що знижує ризик збоїв у роботі мережі.

Недоліки:

Висока вартість – через складність конструкції і потужне електрообладнання синхронні компенсатори є досить дорогими у виробництві та встановленні.

Великі витрати на обслуговування – синхронні компенсатори потребують регулярного технічного обслуговування, що може бути додатковим навантаженням для підприємства.

Механічне зношування – оскільки синхронні компенсатори мають рухомі частини, з часом вони зношуються і потребують заміни.

Застосування. Синхронні компенсатори широко використовуються в мережах високої напруги, особливо на великих електростанціях і підстанціях. Їх також можна знайти у промислових зонах з високими вимогами до якості електроенергії та у випадках, коли необхідна велика кількість реактивної потужності.

1.3 Релейний захист та автоматика пристроїв КРП

В даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи здійснено розрахунок релейного захисту пристрою БСК типу УКР 0,4-200/50.

Як правило, конденсаторні установки є основним засобом компенсації реактивної потужності в електромережах. Це пов'язано з тим, що вони мають значні переваги перед іншими засобами компенсації, а саме [13]:

- 1) низькі втрати активної енергії;
- 2) відсутність обертових частин;
- 3) відносно низькі капітальні вкладення;
- 4) ємність конденсатора можна вибирати з широким спектром величин;
- 6) можна встановити в будь-якій точці мережі;
- 6) під час роботи не створюється шум;
- 7) установки прості в установці та експлуатації;

Основним захистом від замикань між контактами БСК є струмова відсічка.

$$I_{\text{св}} = k_{\text{н}} \cdot I_{\text{вкл}}; \quad (1.2)$$

де $k_{\text{н}}$ - коефіцієнт надійності, $k_{\text{н}} = 1,5$;

$I_{\text{вкл}}$ - струм включення БСК, розраховується за формулою:

$$I_{\text{вкл.БСК}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.БСК}} \left(k_{\text{у}} + \sqrt{\frac{W_{\text{КЗ}}}{Q_{\text{ном.БСК}}}} \right); \quad (1.3)$$

де $I_{\text{ном.БСК}}$ - номінальний струм БСК;

$W_{\text{КЗ}}$ - потужність КЗ на шинах, в місці встановлення БСК;

$Q_{\text{ном.БСК}}$ - номінальна потужність БСК;

$k_{\text{у}}$ - коефіцієнт завантаження конденсаторів по напрузі:

$$k_{\text{у}} = \frac{U_{\text{розр}}}{\sqrt{2} \cdot n \cdot U_{\text{н.к.}}} = \frac{0,4}{\sqrt{2} \cdot 6 \cdot 0,4} = 0,118; \quad (1.4)$$

$$I_{\text{вкл.БСК}} = \sqrt{2} \cdot 202 \left(0,118 + \sqrt{\frac{20}{0,15}} \right) = 3,332 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{св}} = 1,5 \cdot 3,332 = 4,99 \text{ (кА)}.$$

Визначимо струм трифазного КЗ.

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{1,3 \cdot S_{\text{н.т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,3 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 11820 \text{ (А)};$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,865 \cdot 11820}{4990} = 2.$$

Приймається реле типу РТ-40/200 з'єднання котушок паралельне, межі уставок струму спрацьовування реле 100—200 А [13].

Витримка часу вибирається на ступінь селективності 0,3 – 0,5 с:

$$t_{\text{сзБСК}} = t_{\text{свГр-р}} + \Delta t' = 0,0 + 0,5 = 0,5 \text{ (с)}.$$

Реле часу приймається типу ЭВ-114 з межею уставок за часом 0,1 – 1,3 с.

Максимальний струмовий захист. Уставка по струму вибирається з умов:

а) неспрацьовування захисту при післяаварійних перевантаженнях по виразу:

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot I_{\text{ном.БСК}}}{k_{\text{в}}}; \quad (1.5)$$

де $k_{\text{н}}$ - коефіцієнт надійності, $k_{\text{н}} = 1,2$;

$k_{\text{пов}}$ - коефіцієнт повернення реле ($k_{\text{пов}} = 0,8$).

$$I_{\text{сз}} = \frac{1,2 \cdot 202}{0,8} = 303 \text{ (А)}.$$

б) за узгодженням з попереднім захистом:

$$I_{\text{сз}} = k_{\text{нс}} \cdot I_{\text{сзГр}} = 1,3 \cdot 303 = 393,9 \text{ (А)}.$$

Приймається уставка $I_{\text{сз}} = 393,9 \text{ (А)}$.

в) визначається чутливість захисту при двофазному КЗ на шинах 0,4 кВ ТП1 в мінімальному режимі системи:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,865 \cdot 11820}{393,9} = 14,97 > 1,5.$$

г) струм спрацьовування реле визначається по виразу:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{сз}}}{n_{\text{ТС}}} = \frac{393,9}{20} = 19,7 \text{ (А)}.$$

де $n_{\text{ТС}}$ – коефіцієнт трансформації ТС прийнятий рівним 100/5.

Приймається реле типу РТ 40/100.

д) час спрацьовування захисту визначається за узгодженням з МСЗ трансформаторі ТП1, що має час спрацьовування – 1,2с.

$$t_{\text{сзКЛ}} = t_{\text{сзМСЗтр}} + \Delta t' = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ (с)}.$$

Приймається реле часу типу ЕВ-124 з межами уставок 0,25—3,5с.

Захист від однофазних замикань на землю. Захист від замикань на землю виконується по струму нульової послідовності, так само як і захист інших фідерів.

Струм замикання на землю всієї кабельної мережі 10 кВ, яка живить ТП 1:

$$3I_{0\text{КЛмережі}}^{(1)} = \frac{k_{\text{рем}} \cdot U_{\text{мф}} \cdot l}{10} = \frac{0,54 \cdot 0,4 \cdot 0,071}{10} = 0,03 \text{ (А)}.$$

де $U_{\text{мф}}$ – міжфазна напруга, кВ;

l – довжина мережі, км;

$k_{\text{рем}}$ – коефіцієнт, що враховує ремонтний режим.

Струм спрацьовування захисту визначається таким чином:

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{відл}} \cdot k_{\text{стр}} \cdot 3I_{0\text{КЛ}}^{(1)}}{10} = \frac{1,1 \cdot 4 \cdot 0,03}{10} = 0,0132 \text{ (А)}.$$

де $k_{\text{відл}}$ – коефіцієнт налаштування, що приймається рівним 1.1—1.2;

$k_{\text{стр}}$ – коефіцієнт стрибка.

Коефіцієнт чутливості:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{КЛмережі}}^{(1)} - 3I_{0\text{КЛ}}^{(1)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,03 - 0,0108}{0,0132} = 1,45 > 1,25.$$

Умова чутливості виконується.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Здійснено загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств. Описано структуру, функції, особливості та проблеми ЕМПП. Електричні мережі промислових підприємств відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності виробничих процесів, їх надійності та економічності. Вони характеризуються високою енергоємністю, складною структурою, необхідністю компенсації реактивної потужності та підвищеними вимогами до якості електроенергії. Для підвищення ефективності важливо впроваджувати сучасні методи керування, автоматизації, реконструкції мереж і компенсації реактивної потужності, що сприятиме стабільному енергозабезпеченню та оптимізації витрат.

2. Описано ефект від використання пристроїв КРП в електричних мережах ЕМПП. Питання КРП завжди займало важливе місце в комплексі проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності передачі, розподілу та споживання електроенергії. Правильне вирішення цих проблем дозволяє значно підвищити якість електропостачання та заощадити фінансові та матеріальні ресурси.

3. Проведено аналіз найбільш розповсюджених пристроїв КРП в електричних мережах ЕМПП. Вибір конкретного типу пристрою компенсації залежить від параметрів мережі, типу та динаміки навантаження, вимог до надійності та швидкості компенсації, а також економічних аспектів.

4. Розраховано та обрано релейний захист для БСК типу УКР 0,4-200/50.

В цілому показано, що ефективне керування пристроями КРП в електричних мережах ЕМПП є важливим завданням, рішення якого дозволяє досягти зниження витрат електроенергії, підвищення коефіцієнта потужності, оптимізації енергоспоживання, покращення якості електроенергії, зменшення навантаження на обладнання та зниження експлуатаційних витрат, що в цілому сприяє підвищенню ефективності та надійності роботи електричних мереж промислових підприємств.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КРП

2.1 Загальний аналіз методів керування пристроями КРП

Методи керування пристроями КРП включають різні підходи для забезпечення стабільної роботи електричних мереж та мінімізації втрат енергії [8].

Методи керування пристроями КРП в електричних мережах включають різні стратегії, які забезпечують оптимальний розподіл і регулювання реактивної потужності для підвищення ефективності мережі, зниження втрат і підтримки стабільності [14]. Ці методи можуть бути як простими ручними, так і складними автоматизованими, які використовують інтелектуальні системи та алгоритми оптимізації.

Вибір типу, потужності, місця встановлення і методу керування пристроями КРП має забезпечувати найоптимальніший економічний ефект.

У зв'язку з різними режимами роботи електричних мереж відповідно до характеру навантаження споживачів було розроблено низку методів керування пристроями КРП [15]:

- за часом роботи навантаження;
- за струмом;
- за напругою вузла під'єднання;
- за споживаною РП;
- за величиною коефіцієнту потужності $\cos\varphi$.

Цей підхід зосереджується на конкретних параметрах електричної мережі, які безпосередньо впливають на роботу КРП

В таблиці 2.1 подано порівняльний аналіз даних методів керування пристроями КРП за параметрами мережі.

Дана таблиця дозволяє оцінити переваги та недоліки кожного методу керування КРП та підібрати оптимальний метод залежно від умов мережі та вимог до її стабільності й енергоефективності.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно параметрів електричної мережі

Метод керування	Опис	Переваги	Недоліки
За часом роботи навантаження	У цьому методі робота КРП контролюється відповідно до попередньо визначеного графіку навантаження. Під час пікових годин КРП включається для забезпечення стабільної напруги, а в непікові періоди він може працювати на зниженій потужності або вимикатись. Це дозволяє зменшити енергоспоживання та знос обладнання в періоди, коли компенсація не є критичною.	- Оптимізація роботи пристрою відповідно до реального графіку навантаження. - Зниження енергоспоживання в періоди низького навантаження. - Менший знос обладнання, підвищення терміну служби.	- Може бути недостатньо ефективним при раптових змінах навантаження, не передбачених графіком. - Потребує точного прогнозування пікових та непікових періодів, щоб уникнути перенавантаження або недостатньої компенсації.
За струмом	Метод базується на моніторингу рівня струму в мережі. При досягненні певного порогу струму, який вказує на підвищене навантаження, КРП автоматично активується для компенсації реактивної потужності. Цей метод дозволяє швидко реагувати на зміни навантаження, підвищуючи стабільність мережі.	- Оперативна реакція на зростання навантаження, що забезпечує стабільність мережі. - Підвищена ефективність роботи КРП в умовах частих змін струму. - Прямий зв'язок між рівнем струму та активністю КРП.	- Може реагувати на короточасні сплески струму, що може призводити до зайвих включень та знижує енергоефективність. - Не завжди забезпечує стабільний коефіцієнт потужності, оскільки фокусується лише на рівні струму, а не на реактивній потужності.
За напругою вузла під'єднання	Цей метод керування спирається на контроль рівня напруги у точці під'єднання КРП до мережі. Коли напруга досягає певного порогового значення (високого або низького), КРП автоматично коригує рівень компенсації для стабілізації напруги у вузлі під'єднання, що запобігає перенапрузі чи недостатній напрузі.	- Підтримання стабільного рівня напруги в точці підключення, що знижує ризик нестабільності в мережі. - Зменшення ймовірності перенапруги та зниження напруги, що позитивно впливає на надійність роботи електрообладнання.	- Чутливість до коливань напруги може викликати часті включення та виключення пристрою в нестабільних мережах. - Потребує точного налаштування порогових значень для уникнення небажаних спрацьовувань при незначних коливаннях напруги.

Продовження таблиці 2.1

За споживаною реактивною потужністю (РП)	Цей метод керування базується на постійному вимірюванні рівня споживання реактивної потужності в мережі. Коли рівень РП досягає визначеного порогу, КРП активується або змінює режим роботи, щоб компенсувати реактивне навантаження. Завдяки цьому методу пристрій забезпечує ефективну компенсацію, відповідно до актуальних потреб мережі в кожен момент часу.	- Точна компенсація реактивної потужності відповідно до реального навантаження. - Зниження втрат на передачу електроенергії, підвищення стабільності напруги. - Ефективний підхід для мереж з постійними коливаннями реактивної потужності.	- Потребує високоточного обладнання для вимірювання РП, що може збільшити витрати на обслуговування. - Може бути неефективним при дуже швидких змінах реактивного навантаження, оскільки пристрій може не встигати коригувати поточні параметри.
За коефіцієнтом потужності (cosφ)	У цьому методі пристрій активується, коли коефіцієнт потужності (cosφ) падає нижче заданого рівня. Це дозволяє підтримувати оптимальний рівень cosφ, що забезпечує максимальну енергоефективність мережі та знижує втрати. Метод підходить для умов, коли cosφ коливається через зміни активної чи реактивної складових навантаження.	- Забезпечує підтримку оптимального коефіцієнта потужності, знижуючи втрати електроенергії. - Покращує енергоефективність системи, мінімізуючи витрати на компенсацію. - Знижує вплив реактивної потужності на стабільність мережі.	- Залежність від точності вимірювання коефіцієнта потужності, що може потребувати додаткових витрат на обслуговування. - Може реагувати на тимчасові коливання cosφ, що призводить до частих включень/виключень та зниження ефективності КРП.

Дослідження методів керування пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств включає вивчення наступних аспектів:

1. Цілі КРП. При проектуванні електроенергетичних систем мета - мінімізувати сумарні витрати на нове будівництво за рахунок зниження потоків реактивної потужності за елементами мережі. При експлуатації - забезпечити надійне та якісне забезпечення споживачів електричною енергією при мінімальних додаткових вкладеннях, а також знизити експлуатаційні витрати.

2. Завдання КРП. Балансова задача передбачає виключення дефіциту реактивної потужності у системі загалом, що забезпечує необхідні рівні напруги на

шинах генераторів електричних станцій. Вилучення місцевих дефіцитів реактивної потужності дозволяє відрегулювати напруги в центрах живлення. Економічна задача - оптимізаційна, при її вирішенні цільовою функцією є наведені витрати, які в залежності від методу включають різне поєднання таких параметрів, як вартість компенсуючого пристрою, втрати активної і реактивної потужності в мережі, відхилення напруг у споживачів, пропускна здатність елементів мережі.

В таблиці 2.2 подано порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно організації процесу керування і способах контролю за роботою КРП.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно організації процесу керування і способах контролю за роботою КРП

Метод керування	Опис	Переваги	Недоліки
Автоматичне керування	Автоматичне керування використовує датчики для моніторингу параметрів мережі, таких як напруга, струм або коефіцієнт потужності ($\cos\phi$). На основі заздалегідь встановлених порогів система автоматично вмикає або вимикає КРП для забезпечення необхідної компенсації реактивної потужності. Це дозволяє стабілізувати напругу та знизити втрати енергії.	- Швидка реакція на зміни навантаження або напруги, що покращує стабільність мережі. - Мінімізація людського втручання завдяки автоматизації. - Зниження втрат на передачу енергії та підвищення коефіцієнта потужності завдяки своєчасному реагуванню на зміни в мережі.	- Висока вартість впровадження, оскільки необхідні якісні датчики та контролери. - Складність налаштування та обслуговування, особливо у великих мережах. - Вимагає регулярного калібрування для забезпечення точності роботи, особливо у разі нестабільних умов в мережі.
Централізоване керування	Централізоване керування передбачає контроль усіх пристроїв КРП з єдиного центрального пункту управління. Це дозволяє координувати роботу всіх КРП в мережі для досягнення оптимальної компенсації та стабільності. Система може керувати КРП на основі даних про загальне навантаження, що знижує ймовірність перевантажень або перенапруги.	- Узгоджене та скоординоване керування всіма КРП, що сприяє підвищенню стабільності всієї мережі. - Легкість у моніторингу та діагностиці проблем, оскільки всі пристрої контролюються з одного місця. - Підвищення ефективності управління енергоспоживанням в масштабах усієї мережі.	- Залежність від центрального пункту управління: якщо він виходить з ладу, це може призвести до проблем з управлінням КРП. - Високі вимоги до комунікаційної інфраструктури для забезпечення надійного зв'язку. - Потреба у складному програмному забезпеченні для централізованого керування.

Продовження таблиці 2.2

Ручне керування	Оператор вручну вмикає або вимикає КРП на основі спостереження за станом мережі та свого досвіду. Це найбільш простий і дешевий метод керування, який застосовується в невеликих системах або при відсутності автоматичних систем. Метод дозволяє швидко адаптуватися до нестандартних ситуацій, де автоматизація може бути недоцільною.	- Проста реалізація з мінімальними витратами на обладнання. - Гнучкість у випадках нестандартних ситуацій або непередбачуваних умов. - Не вимагає складних систем управління, тому легко інтегрується у невеликі мережі.	- Велика залежність від кваліфікації оператора, що може призвести до помилок. - Можливі затримки в реакції на зміни, особливо в умовах різких коливань навантаження. - Не підходить для великих мереж або складних систем, де швидкість реакції є критичною.
Програмовані логічні контролери (PLC)	Використання програмованих логічних контролерів (PLC) дозволяє автоматизувати процес керування КРП, програмуючи їх на виконання певних завдань у залежності від умов в мережі. PLC можна налаштувати на різні сценарії та параметри, що дозволяє гнучко керувати КРП, реагуючи на зміни в режимах навантаження або інших параметрів.	- Висока гнучкість у налаштуванні та можливість адаптації під специфічні потреби мережі. - Надійність завдяки автоматизації та здатності швидко реагувати на зміни. - Можливість інтеграції з іншими системами управління для повної автоматизації процесу.	- Висока вартість впровадження і налаштування системи. - Потребує висококваліфікованого персоналу для обслуговування та програмування. - Вимагає періодичного оновлення програмного забезпечення для підтримки оптимальної роботи та безпеки.
Керування на основі графіків навантаження	Цей метод передбачає роботу КРП відповідно до заздалегідь складених графіків навантаження, що дозволяє уникати зайвих включень у періоди низького навантаження. Графіки зазвичай складаються на основі аналізу історичних даних про навантаження, що дозволяє прогнозувати пікові та непікові періоди з високою точністю.	- Зниження витрат на енергоспоживання в періоди низького навантаження, що сприяє економії енергії. - Оптимальне використання ресурсів, зменшення зносу обладнання, що подовжує його термін служби. - Зниження кількості включень та виключень пристроїв.	- Недостатня гнучкість у випадку раптових змін у навантаженні, які не були передбачені графіком. - Потреба у постійному оновленні графіків на основі аналізу даних для уникнення неточностей. - Ризик недостатньої компенсації або перевантаження при значних відхиленнях від графіка.

Методи керування пристроями КРП описані в таблиці 2.2 більше спрямовані на організаційних і технічних аспектах контролю, де кожен метод має специфічний спосіб управління і може включати різний рівень автоматизації і централізації.

2.2 Математичні моделі методів керування пристроями КРП

Оптимальні впливи на систему електропостачання можна визначити на підставі лінійних математичних моделей з булевими змінними, якими описується стан (ввімкнено або вимкнено) кожної секції пристрою керування [16]. Всі можливі ситуації, що можуть мати місце, охоплюються математичними моделями (табл. 2.3),

Таблиця 2.3 – Математичні моделі керування пристроями БСК

Математична модель		В яких випадках використовується
$\begin{cases} Q_B(\mathbf{X}) = Q' - \Delta Q \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ Q' - \Delta Q \mathbf{X} \geq Q_{\text{доп}} \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\} \end{cases}$	(2.1)	Для прийняття рішення, що забезпечує величину $Q_{\text{доп}}$ в години мінімальних навантажень енергосистеми при управлінні реактивною потужністю підприємства або мінімум втрат активної потужності в мережах підприємства, а також для забезпечення стійкості вузла навантажень.
$\begin{cases} Q_B(\mathbf{X}) = Q' - \Delta Q \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ 0 \leq Q' - \Delta Q \mathbf{X} \leq Q_{\text{доп}} \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\} \end{cases}$	(2.2)	Для прийняття рішення, якому відповідає величина реактивної потужності по підприємству в межах $0 \div Q_{\text{доп}}$, що необхідно при забезпеченні погодженого графіка реактивних навантажень в режимах максимальних навантажень мереж енергопостачальних організацій, а також для зменшення втрат активної потужності в мережі живлення.
$\begin{cases} Q_B(\mathbf{X}) = Q' - \Delta Q \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ Q' - \Delta Q \mathbf{X} \geq 0 \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\} \end{cases}$	(2.3)	Для прийняття рішень про вмикання БСК підприємства в години, що не характерні для енергосистеми, при забезпеченні погодженого графіка реактивних навантажень, мінімізуючи втрати активної потужності та споживання реактивної.
$\begin{cases} Q_B(\mathbf{X}) = Q' - \Delta Q \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ U' + \Delta U \mathbf{X} \leq U_{\text{max доп}} \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\} \end{cases}$	(2.4)	Для визначення вектора керування у вузлах навантаження, де напруга в процесі компенсації реактивної потужності може набувати недопустимих значень.
$\begin{cases} Q_B(\mathbf{X}) = Q' - \Delta Q \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ U' + \Delta U \mathbf{X} \geq U_{\text{min доп}} \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\} \end{cases}$	(2.5)	Для визначення вектора керування КУ у вузлах навантажень, коли засоби компенсації реактивної потужності використовуються для регулювання напруги.

де Q_v – реактивне навантаження на ввіді живлення; Q' – природне споживання реактивної потужності (коли всі БСК відімкнені); ΔQ – матриця потужностей секцій БСК вимірністю $(1 \times m)$; X – вектор змінних вимірністю $(m \times 1)$, кожна компонента якого x_i дорівнює одиниці, коли i -ту секцію доцільно ввімкнути, або нулю, якщо вмикати не потрібно; X – вектор, кожна компонента якого i x пов'язана з відповідною компонентою x_i так, що якщо $x_i = 1$, то i $x = 0$ і навпаки, фізичного змісту i x не має; p – стовпцева одинична матриця вимірністю $(m \times 1)$; $Q_{\text{доп}}$ – допустиме значення реактивних навантажень, що встановлюється, наприклад, з міркувань мінімальних втрат потужності; ΔU – матриця добавок напруг, що створюються при ввімкненні відповідних секцій БСК, вимірністю $(1 \times m)$; $U_{\text{мін. доп.}}$, $U_{\text{мах. доп.}}$ – мінімально та максимально допустимі значення напруги в вузлі; U' – значення напруги в вузлі, що відповідає природному споживанню реактивної потужності.

2.3 Метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП

Методи керування пристроями БСК спрямовані на оптимізацію компенсації реактивної потужності для підтримки стабільної роботи електричної мережі, зменшення втрат і підвищення якості електроенергії.

Необхідність використання автоматичного керування пристроями КРП зумовлена такими причинами:

- в більшості випадків добовий графік електричних навантажень на підприємствах є змінним;
- необхідність виконувати вимоги енергосистеми до споживання реактивної потужності (мінімальних навантажень та поза пікові) з метою зменшення плати за реактивну енергію;
- намагання споживачів виконувати вимоги енергосистеми при найменших втратах від передавання недокомпенсованої реактивної потужності в їх мережах (шляхом їх мінімізації за допомогою спеціальних систем і пристроїв оптимального управління КУ);

– в позапікові періоди електроспоживання, коли ЕС не регламентує споживання РП і енергії із її мережі, споживачам доцільно використовувати наявні КУ для максимально можливого зниження втрат в їх мережах (при $\Psi=0$ і $a=1$).

Відомий метод керування пристроєм БСК [7], згідно з якого ємності ступенів батареї конденсаторів встановлюють пропорційно степеням двійки. При цьому, маючи m паралельно включених конденсаторів у батареї, можна отримати 2^m ступенів регулювання реактивної потужності. Так, маючи чотири конденсатори з реактивними потужностями 1, 2, 4 та 8 кВАр, можна отримати 16 ступенів регулювання - від 0 до 15 кВАр з дискретністю 1 кВАр.

Недоліком цього методу є те, що мала кількість ступенів створює розриви в регулювальних характеристиках пристрою КРП, що знижує точність компенсації реактивної потужності.

У [17] запропоновано винахід, що відноситься до електротехніки, який може бути використаний для КРП та покращення якості електроенергії розподільчої мережі. Пристрій використовує метод керування КРП, який полягає в тому, що батарею активних компенсаторів і комутованих конденсаторів підключають паралельно навантаженню і встановлюють струм активних компенсаторів рівним реактивній складовій першої гармоніки струму навантаження протилежного знаку.

Даний запропонований метод керування базується на встановленні співвідношення ємностей ступенів батареї конденсаторів у складі компенсатора РП, який складається з послідовно з'єднаної БК і активного фільтра рисунок 2.1.

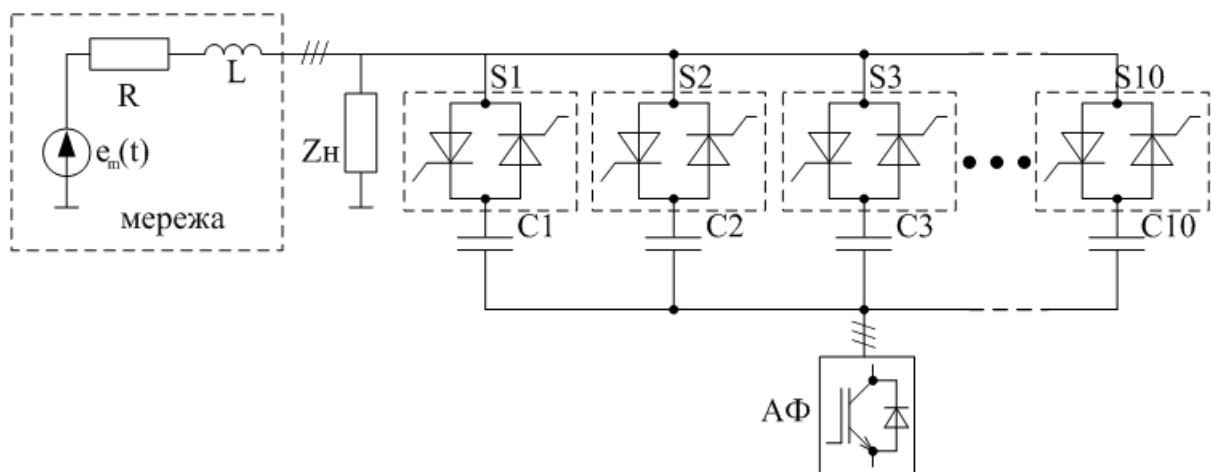


Рисунок 2.1 – Пристрій для КРП з плавним (безперервним) регулюванням реактивної потужності

Для реалізації способу КРП, що передбачає підключення паралельно навантаженню з'єднаних між собою активного компенсатора та батареї комутованих конденсаторів і встановлення струму активного компенсатора рівним реактивній складовій першої гармоніки струму навантаження протилежного знаку, згідно з винаходом співвідношення ємностей суміжних каскадів батареї комутованих конденсаторів встановлюють за формулою:

$$\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U + E}{U - E}; \quad (2.6)$$

де C_{n+1} – ємність ступеня з номером $(n+1)$;

C – ємність ступеня з номером n ;

E - максимальна вихідна напруга;

U - складова напруги мережі.

На рисунку 2.2 зображено регулювальна характеристика КРП.

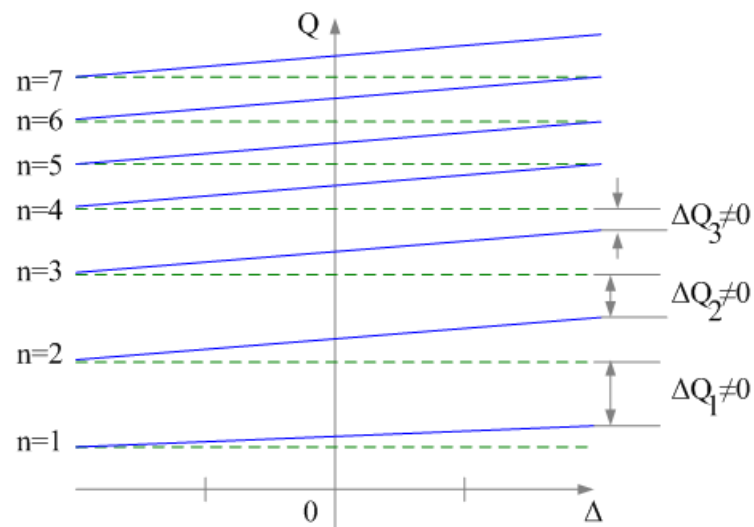


Рисунок 2.2 – Регулювальна характеристика КРП

ЕРС активного компенсатора $e(t)$ генерується системою керування КРП таким чином, що КРП є джерелом струму $i(t)$ по відношенню до мережі і його спектр включає лише основну частоту мережі.

Якщо не враховувати ефективні втрати потужності в розподільчому пристрої, струм розподільчого пристрою можна вважати суто реактивним i , отже, оперувати

модулями напруги та струму (середньоквадратичними значеннями). Основними струмами пристрою РПН визначається як:

$$I_K = \frac{U - E}{X_C} E; \quad (2.7)$$

де X_C - опір батареї конденсаторів, Ом;

Управління потужністю пристрою, що слідкує за навантаженням, базується на дискретній зміні X_C за рахунок перемикання конденсаторної батареї та плавному регулюванні E .

Значення РП, що генерується пристроєм, який слідує за навантаженням, визначається, з урахуванням попереднього рівняння, наступним чином:

$$Q = I_K (U_C + E) = \frac{U - E}{X_C} (U_C + E); \quad (2.8)$$

де U_C - складова напруги на конденсаторах на основній частоті, В.

Враховуючи те, що $U = U_C + E$, останній вираз можна представити:

$$Q = \frac{U - E}{X_C} U; \quad (2.9)$$

Тоді РП n -го ступеня рівна:

$$Q_n = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U^2 \cdot (1 - \Delta); \quad (2.10)$$

Коефіцієнт Δ може приймати значення в діапазоні $[-\Delta_{\max} \dots 0 \dots +\Delta_{\max}]$, причому максимальна реактивна потужність n -го ступеня забезпечується при від'ємному значенні коефіцієнта Δ , а мінімальна реактивна потужність $(n+1)$ -го ступеня - при позитивному значенні коефіцієнта Δ . Від'ємний знак коефіцієнта Δ вказує на зміну фази ЕРС активного компенсатора на 180 електричних градусів відносно до мережевої напруги U .

Для досягнення плавного регулювання РП необхідно виконати наступні умови:

$$Q_{n.\max} = Q_{(n+1).\min}; \quad (2.11)$$

Запропонований метод керування пристроєм КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання реактивної потужності.

2.4 Методи керування пристроями СТК

Керування статичними компенсаторами (СТК або STATCOM) в електричних мережах зазвичай включає такі методи:

1. Векторне керування. Це один з найбільш ефективних методів, який дозволяє швидко регулювати реактивну потужність. Суть векторного керування полягає в тому, що пристрій може регулювати як реактивну, так і активну потужність окремо, завдяки розділенню компонентів струму. Використовується для точного регулювання напруги та стабілізації мережі [14].

2. Пропорційно-інтегральне (PI) керування. PI-регулятори застосовуються для підтримки заданої напруги та реактивної потужності. Вони забезпечують плавне регулювання і компенсацію реактивної потужності, проте менш ефективні в умовах високої динаміки навантажень.

3. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Метод ШІМ використовується для керування тиристорами або IGBT-транзисторами в схемі STATCOM, що дозволяє регулювати форму сигналу та рівень напруги. ШІМ забезпечує високу точність регулювання потужності, але може викликати гармонічні викривлення, що потребує фільтрації.

4. Фазове керування. Застосовується для синхронізації фаз між пристроєм STATCOM та мережею. Це дозволяє зменшити гармонічні викривлення та забезпечити стабільну роботу пристрою.

5. Прогнозне керування. Метод прогнозного керування ґрунтується на прогнозуванні поведінки навантаження та динамічному налаштуванні пристрою STATCOM. Це знижує рівень коливань і підвищує стабільність мережі.

Вибір конкретного методу або їх поєднання залежить від вимог до стабілізації напруги, швидкості реагування, складності системи та ресурсів.

Керування пристроями СТК включає різні методи, які дозволяють адаптувати їх роботу до змін навантаження та параметрів електромережі. СТК є швидкодіючими та надійними пристроями для КРП та підтримання стабільності напруги, особливо в умовах змінного навантаження.

2.5 Система керування СТК компанії АВВ

Система керування СТК, що поставляються компанією АВВ, є комбінованою і містить в собі прямий і зворотний канали (рис. 2.3). У прямому каналі розраховуються ортогональні d-q складові струму навантаження для прямої і зворотної послідовностей.

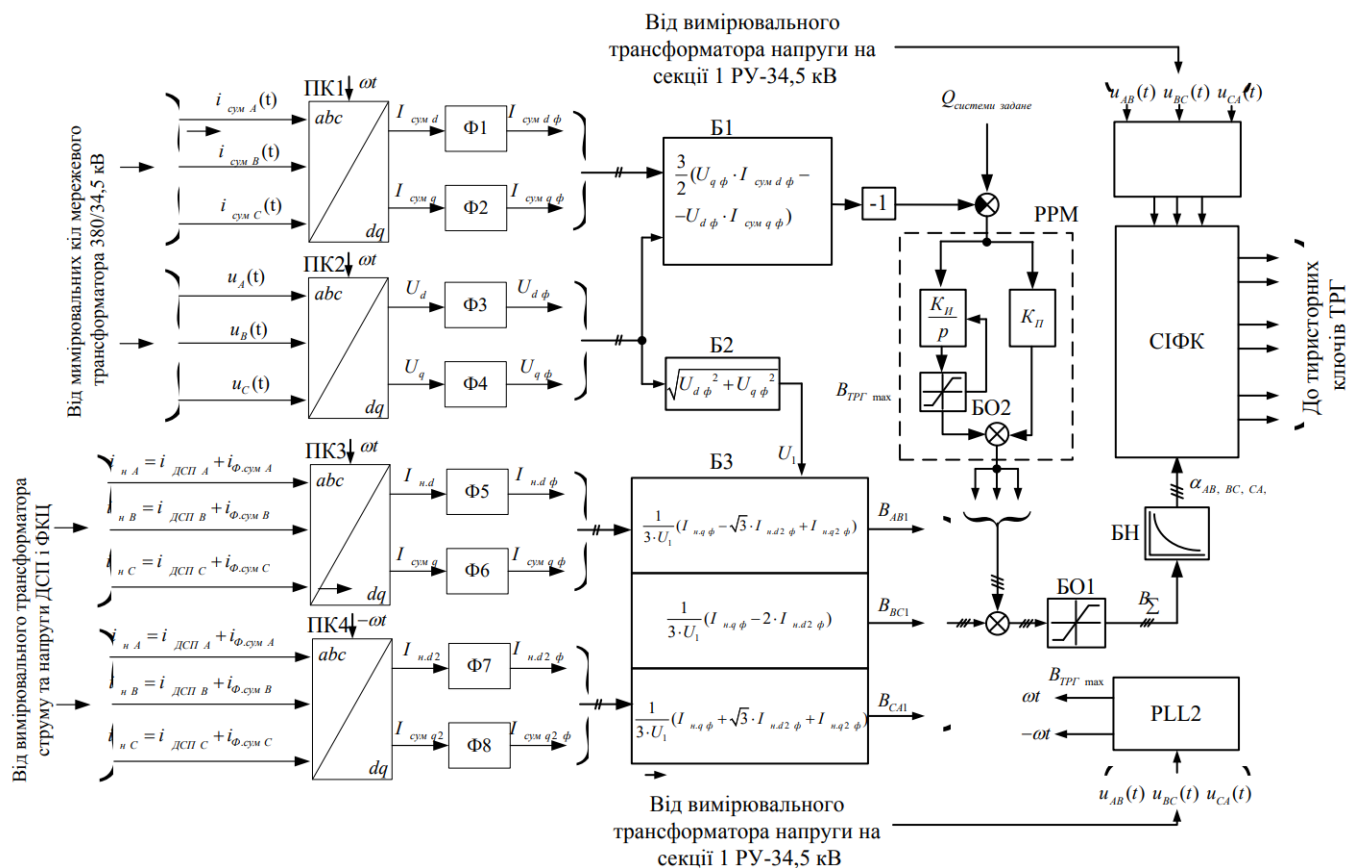


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи керування СТК

Ортогональні складові миттєвих струмів прямої послідовності в системі dq-координат:

$$\begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos(\omega t - \pi/2) + i_\beta \sin(\omega t - \pi/2); \\ i_q &= i_\alpha \sin(\omega t - \pi/2) - i_\beta \cos(\omega t - \pi/2). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ортогональні складові миттєвих струмів зворотної послідовності в системі dq-координат:

$$\begin{aligned} i_{d2} &= i_\alpha \cos(\omega t - \pi/2) - i_\beta \sin(\omega t - \pi/2); \\ i_{q2} &= i_\alpha \sin(\omega t - \pi/2) + i_\beta \cos(\omega t - \pi/2). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Блоки фазового автоналаштування частоти (PLL 1–2) використовуються для коректної роботи перетворювачів ПК і СІФК в умовах спотворення форми напруги на секції 34,5 кВ. Ортогональні складові прямих і зворотних послідовностей струмів і напруг розраховуються в блоках перетворення координат (ПК 1–4). Вихідні сигнали блоків ПК проходять через цифрові фільтри ковзного середнього (Ф1–Ф8), частота налаштування яких дорівнює 50 Гц.

2.6 Компенсація реактивної потужності при мінімумі втрат активної

Таблиця 2.1 містить аналітичні моделі управління КУ, що забезпечують необхідну вхідну реактивну потужність із мінімізацією втрат. Ці моделі представляють сучасний підхід до керування КУ в мережах промислових підприємств

де Q_i – реактивне навантаження i -ого вузла; Q_{ci} – потужність секції КУ, встановленої в i -ому вузлі; R_i – активний опір лінії, що живить i -тий вузол; R – активний опір живлячої лінії; m – кількість вузлів в мережі; U – напруга мережі.

Таблиця. 2.5 - Моделі керування потужностями конденсаторних установок

№	Коротка характеристика методу	Аналітична модель керування	Переваги методу
1	Забезпечення ВРП по мінімуму втрат мереж окремого дерева	$Q_i^2 R_i \rightarrow \min$	Додаткове зниження втрат, порівнюючи з існуючими методами
2	Забезпечення ВРП по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж	$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$	Додаткове зниження втрат
3	Забезпечення ВРП по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з живлячою лінією	$\frac{2Q_{ci} R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$	Додаткове зниження втрат

У першому випадку запропоновано модель управління реактивною потужністю, що передбачає оптимальний вибір комбінацій КУ для мінімізації втрат у мережі споживача.

Однак недоліком такого підходу є те, що секції КУ вмикаються не для мінімізації втрат, а відповідно до величини втрат від перетоків реактивної потужності, що не завжди дозволяє досягти максимального зменшення втрат.

Друга модель дозволяє прогнозувати зниження втрат залежно від потужності та розташування секції, яка вмикається для забезпечення реактивної потужності, забезпечуючи додаткову економію.

Третій підхід спрощує управління через декомпозицію мережі, що робить його зручнішим у порівнянні з існуючими методами. Розглянемо ці підходи докладніше [17].

Для радіальних мережах промислових підприємств з живлячою лінією зниження втрат відповідно другої моделі при ввімкненні секцій КУ в i -ому вузлі, потужністю Q_{ci} визначається за формулою:

$$\delta(\Delta P)_i = \frac{(2 \cdot Q_i \cdot Q_{ci} - Q_{ci}^2) \cdot R_i}{U^2}, \quad (2.14)$$

або:

$$\delta(\Delta P)_i = A_i \cdot Q_i - B_i, \quad (2.15)$$

де $A_i = \frac{2 \cdot Q_{ci} \cdot R_i}{U^2}; B_i = \frac{Q_{ci}^2 \cdot R_i}{U^2}.$

В дійсності зниження втрат для радіальних мережах промислових підприємств з живлячою лінією необхідно визначати таким чином:

$$\delta(\Delta P)_i = \frac{2 \cdot Q_{ci} \cdot R \cdot \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 \cdot R}{U^2} + \frac{(2 \cdot Q_i \cdot Q_{ci} - Q_{ci}^2) \cdot R_i}{U^2} \quad (2.16)$$

або :

$$\delta(\Delta P)_i = C \cdot \sum_{i=1}^m Q_i - D + A_i \cdot Q_i - B_i, \quad (2.17)$$

$$A_i = \frac{2 \cdot Q_{ci} \cdot R_i}{U^2}; B_i = \frac{Q_{ci}^2 \cdot R_i}{U^2}; D = \frac{Q_{ci}^2 \cdot R}{U^2}; A_i = \frac{2 \cdot Q_{ci} \cdot R}{U^2}.$$

Якщо врахувати, що величина $\sum_{i=1}^m Q_i$ є сумарною реактивною потужністю підприємства Q_Σ , то величину $\delta(\Delta P)_i$ можна представити як:

$$\delta(\Delta P)_i = C \cdot Q_\Sigma - D + A_i \cdot Q_i - B_i. \quad (2.18)$$

2.7 Алгоритми оптимального керування потужностями КУ

В даній частині кваліфікаційної роботи розглянемо приклад керування потужностями конденсаторних установок. Для розподільчої мережі, показаної на рисунку 2.4, виконаємо розрахунок втрат активної потужності через перетоки реактивної енергії. Вихідні дані, такі як довжина кабельної лінії, активний опір елементів та потужність КУ, наведені на схемі. Споживання реактивної потужності також вказано.

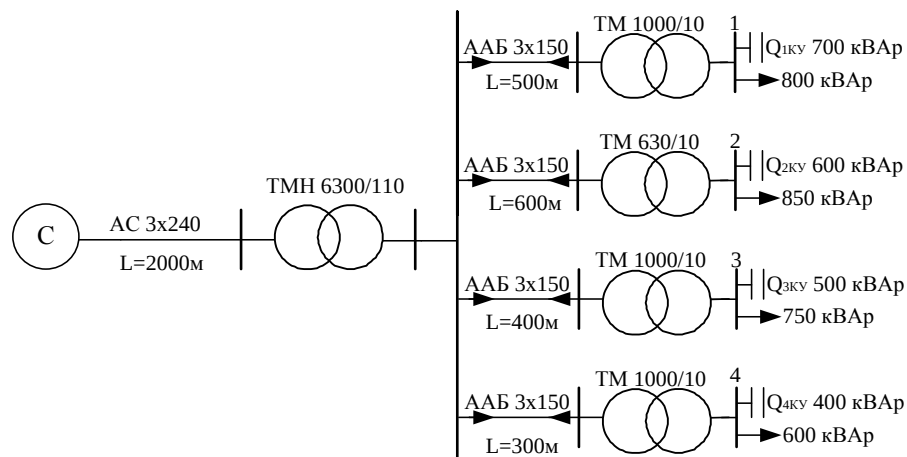


Рисунок 2.4 – Схема розподільчої мережі

Для розв'язку даної задачі представимо схему заміщення мережі рисунок 2.5.

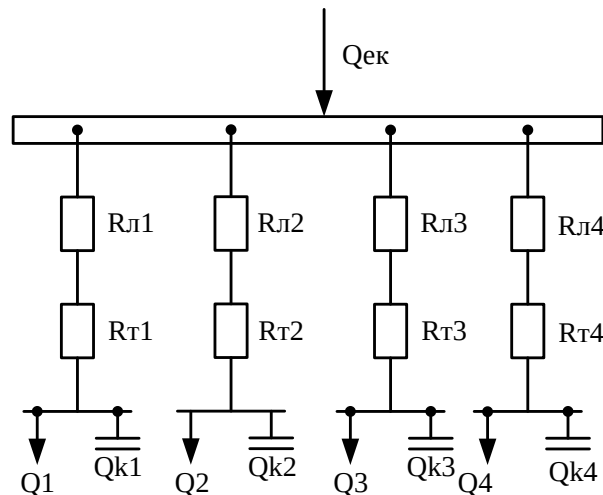


Рисунок 2.4– Схема заміщення розподільчої мережі

Величину еквівалентного опору R_e визначають шляхом послідовного еквівалентування схеми електропостачання підприємства або його вузла. Для магістральних мереж застосовуються формули обчислення послідовних і паралельних опорів, починаючи з кінця магістралі.

Розрахуємо еквівалентний опір i -ї вітки мережі підприємства за формулою:

$$r_{ei} = r_l + r_T. \quad (2.19)$$

де r_l - опір лінії;

r_T - опір трансформатора.

$$r_{e1} = 0,104 + 1,06 = 1,164 \text{ (Ом)}; \quad r_{e2} = 0,1248 + 1,92 = 2,0448 \text{ (Ом)};$$

$$r_{e3} = 0,0832 + 1,06 = 1,143 \text{ (Ом)}; \quad r_{e4} = 0,0624 + 1,06 = 1,12 \text{ (Ом)}.$$

Опір трансформатора розраховується за формулою:

$$r_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_{BH}^2}{S_H^2}. \quad (2.20)$$

де ΔP_k - активні втрати короткого замикання.

$$r_{T1} = r_{T3} = r_{T4} = \frac{10,6 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{1000^2} = 1,06 \text{ (Ом)};$$

$$r_{T2} = \frac{7,6 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{630^2} = 1,9 \text{ (Ом)}.$$

Для ТМ-630/10/0,4 $\Delta P_k = 7600$ (Вт), ТМ-1000/10/0,4 $\Delta P_k = 10600$ (Вт) [6].

Визначаємо опір кабельних ліній за формулою:

$$r_j = r_{0j} \cdot l_j. \quad (2.21)$$

де l_j - довжина кабельної лінії;

r_{0j} - питомий опір кабельної лінії, для ліній $r_{01} = r_{02} = r_{03} = r_{04} = 0,208$ (Ом/км).

$$r_1 = 0,5 \cdot 0,208 = 0,104 \text{ (Ом)}; \quad r_2 = 0,6 \cdot 0,208 = 0,1248 \text{ (Ом)};$$

$$r_3 = 0,4 \cdot 0,208 = 0,0832 \text{ (Ом)}; \quad r_4 = 0,3 \cdot 0,206 = 0,0624 \text{ (Ом)}.$$

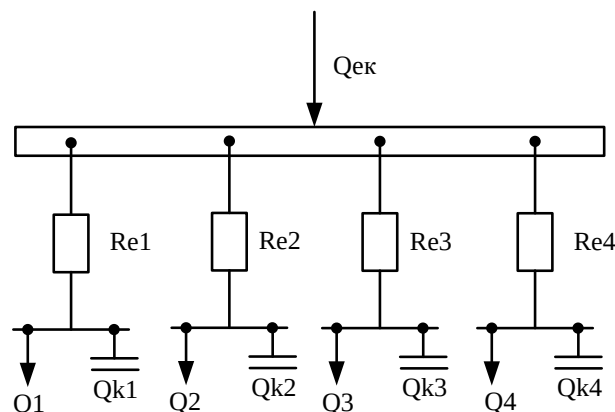


Рисунок 2.5 – Схема заміщення розподільчої мережі

2.8 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом мінімуму втрат мереж окремого дерева

Розглянемо управління потужностями конденсаторних установок, яке за першою моделлю (таблиця 2.5) дозволяє забезпечити вхідну реактивну потужність із мінімізацією втрат у мережі окремого дерева.

Аналітична модель керування має вигляд:

$$Q_i^2 R_i \rightarrow \min \quad (2.22)$$

Визначаємо втрати у всіх відгалуженнях схеми розподільної мережі, що представлена на рисунку 2.3 за формулою:

$$\Delta P_i = \frac{Q_i^2}{U^2} \cdot R_i \quad (2.23)$$

$$\Delta P_1 = \frac{800^2}{10^2} \cdot 1,164 \cdot 10^{-3} = 7,45 \text{ (кВт)}; \quad \Delta P_2 = \frac{850^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 14,77 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_3 = \frac{750^2}{10^2} \cdot 1,143 \cdot 10^{-3} = 6,43 \text{ (кВт)}; \quad \Delta P_4 = \frac{600^2}{10^2} \cdot 1,12 \cdot 10^{-3} = 4,03 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{1,1} = 7,45 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{1,2} = \frac{750^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 11,502 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{1,3} = 6,43 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{1,4} = 4,03 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{3,1} = 7,45 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{3,2} = \frac{550^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 6,19 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{3,3} = 6,43 \text{ (кВт)};$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{2,1} = 7,45 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{2,2} = \frac{650^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 8,64 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{2,3} = 6,43 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{2,4} = 4,03 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\Delta P_{4,1} = \frac{700^2}{10^2} \cdot 1,164 \cdot 10^{-3} = 5,704 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{4,2} = 6,19 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{4,3} = 6,43 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{3,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\Delta P_{5,1} = 5,704 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{5,2} = 6,19 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{5,3} = \frac{650^2}{10^2} \cdot 1,143 \cdot 10^{-3} = 4,829 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{5,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\Delta P_{7,1} = \frac{600^2}{10^2} \cdot 1,164 \cdot 10^{-3} = 4,19 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{7,2} = 4,141 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{7,3} = 4,829 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{7,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\Delta P_{9,1} = \frac{500^2}{10^2} \cdot 1,164 \cdot 10^{-3} = 2,91 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{9,2} = 4,141 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{9,3} = 3,458 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{9,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 4-му вузлі:

$$\Delta P_{11,1} = 2,91 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{11,2} = 2,505 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{11,3} = 3,458 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{11,4} = \frac{500^2}{10^2} \cdot 1,12 \cdot 10^{-3} = 2,8 (\text{кВт}).$$

$$\Delta P_{4,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{6,1} = 5,704 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{6,2} = \frac{450^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 4,141 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{6,3} = 4,829 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{6,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\Delta P_{8,1} = 4,19 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{8,2} = 4,141 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{8,3} = \frac{550^2}{10^2} \cdot 1,143 \cdot 10^{-3} = 3,458 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{8,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{10,1} = 2,91 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{10,2} = \frac{350^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 2,505 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{10,3} = 3,458 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{10,4} = 4,03 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\Delta P_{13,1} = 2,91 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{13,2} = 2,505 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{13,3} = \frac{450^2}{10^2} \cdot 1,143 \cdot 10^{-3} = 2,315 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_{13,4} = 2,8 (\text{кВт}).$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\Delta P_{12.1} = \frac{400^2}{10^2} \cdot 1,164 \cdot 10^{-3} = 1,862 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{12.2} = 2,505 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{12.3} = 2,315 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{12.4} = 2,8 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\Delta P_{15.1} = 1,862 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{15.2} = \frac{250^2}{10^2} \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3} = 1,278 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{15.3} = 2,315 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{15.4} = 1,792 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 4-му вузлі:

$$\Delta P_{14.1} = 1,862 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{14.2} = 2,505 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{14.3} = 2,315 \text{ (кВт)};$$

$$\Delta P_{14.4} = \frac{400^2}{10^2} \cdot 1,12 \cdot 10^{-3} = 1,792 \text{ (кВт)}.$$

- 4x100 квар ввімкнути в 1-му вузлі;
- 6x100 квар ввімкнути в 2-му вузлі;
- 3x100 квар ввімкнути в 3-му вузлі;
- 2x100 квар ввімкнути в 4-му вузлі.

Остаточні значення споживання реактивних потужностей:

$$Q_1 = 400 \text{ (кВАр)}; \quad Q_2 = 250 \text{ (кВАр)};$$

$$Q_3 = 450 \text{ (кВАр)}; \quad Q_4 = 400 \text{ (кВАр)}.$$

На робочих листах “КРП 1-4” Excel створюємо таблиці рисунки 2.6-,2.8 які заповнюємо формулами математичних моделей представлених в таблиці 2.5.

Результати розрахунків за математичною моделлю (2.9) на рисунку 2.6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ЛЖ	Довжини	Питомі	Опір	Опір	Повні актив.	Реактивні нав.,	Пот.	Реактивні нав.					
2		ліній, м	активні опори	ЛЖ	ТП	опір	квар	КУ,	з КУ, квар					
3	ЖЛ	2000	0,122	0,244		0,244								
4	ТП1	500	0,208	0,104	1,060	1,164	800	400	400					
5	ТП2	600	0,208	0,125	1,900	2,025	850	600	250					
6	ТП3	400	0,208	0,083	1,060	1,143	750	300	450					
7	ТП4	300	0,208	0,062	1,060	1,122	600	200	400					
8	Разом							3000	1500	1500				
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														

	вузол 1	КУ, квар	вузол 2	КУ, квар	вузол 3	КУ, квар	вузол 4	КУ, квар
без КУ	7,45	0	14,77	0	6,43	0	4,03	0
1	7,45	0	11,5	100	6,43	0	4,03	0
2	7,45	0	8,64	100	6,43	0	4,03	0
3	7,45	0	6,19	100	6,43	0	4,03	0
4	5,7	100	6,19	0	6,43	0	4,03	0
5	5,7	0	6,19	0	4,83	100	4,03	0
6	5,7	0	4,14	100	4,83	0	4,03	0
7	4,19	100	4,14	0	4,83	0	4,03	0
8	4,19	0	4,14	0	3,46	100	4,03	0
9	2,91	100	4,14	0	3,46	0	4,03	0
10	2,91	0	2,5	100	3,46	0	4,03	0
11	2,91	0	2,5	0	3,46	0	2,8	100
12	2,91	0	2,5	0	2,3	100	2,8	0
13	1,86	100	2,5	0	2,3	0	2,8	0
14	1,86	0	2,5	0	2,3	0	1,79	100
15	1,86	0	1,28	100	2,3	0	1,79	0
Всього		400		600		300		200

Рисунок 2.6 - Забезпечення вхідної РП по мінімуму втрат мереж окремого дерева

2.9 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом прогнозованого максимуму зниження втрат

Розглянемо управління потужностями конденсаторних установок для радіальних мереж, яке забезпечує вхідну реактивну потужність із прогнозованим максимальним зниженням втрат. Аналітична модель управління має такий вигляд:

$$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max \quad (2.24)$$

Задачу розділяємо на етапи, на кожному з яких покроково визначаємо оптимальне місце ввімкнення секцій КУ, орієнтуючись на максимальне зниження втрат активної потужності. Зниження втрат у кожній вітці мережі обчислюється за формулою:

$$\delta(\Delta P)_{ji} = \frac{(2 \cdot Q_i \cdot Q_{ci} - Q_{ci}^2) \cdot R_i}{U^2}, \quad (2.25)$$

де j – крок перебору, $j = 1..4$;

i – індекс вузла, $i = 1..4$.

$$\delta(\Delta P)_{1.1} = \frac{(2 \cdot 800 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,75 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1.2} = \frac{(2 \cdot 850 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,272 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1.3} = \frac{(2 \cdot 750 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1.4} = \frac{(2 \cdot 600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{2.1} = 1,75 \text{ (кВт)}; \delta(\Delta P)_{2.2} = \frac{(2 \cdot 750 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,863 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{2.3} = 1,6 \text{ (кВт)}; \delta(\Delta P)_{2.4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{3,1} = 1,75 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{3,2} = \frac{(2 \cdot 650 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,454$$

$$\delta(\Delta P)_{3,3} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{3,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{5,1} = 1,75 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{5,2} = \frac{(2 \cdot 450 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,636$$

$$\delta(\Delta P)_{5,3} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{5,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{7,1} = 1,51 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{7,2} = \frac{(2 \cdot 350 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,23$$

$$\delta(\Delta P)_{7,3} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{7,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{9,1} = \frac{(2 \cdot 600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,28$$

(кВт);

$$\delta(\Delta P)_{9,2} = 1,23 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{9,3} = 1,372 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{9,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{4,1} = 1,75 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{4,2} = \frac{(2 \cdot 550 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,045$$

$$\delta(\Delta P)_{4,3} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{4,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{6,1} = \frac{(2 \cdot 700 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,51$$

$$\delta(\Delta P)_{6,2} = 1,636 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{6,3} = 1,6 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{6,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{8,1} = 1,51 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{8,2} = 1,23 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{8,3} = \frac{(2 \cdot 650 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,372$$

$$\delta(\Delta P)_{8,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{10,1} = 1,28 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{10,2} = 1,23 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{10,3} = \frac{(2 \cdot 550 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,143$$

$$\delta(\Delta P)_{10,4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{11.2} = 1,23 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{11.3} = 1,143 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{11.4} = 1,232 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{13.1} = 1,05 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{13.2} = \frac{(2 \cdot 250 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 0,82$$

$$\delta(\Delta P)_{13.3} = 1,143 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{13.4} = 1,008 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{16.1} = \frac{(2 \cdot 400 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 0,815$$

$$\delta(\Delta P)_{16.2} = 0,82 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{16.3} = 0,914 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{16.4} = 1,008 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 4-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{15.1} = 0,815 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.2} = 0,82 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.3} = 0,914 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.4} = \frac{(2 \cdot 400 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 0,784$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 4-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{12.1} = 1,05 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{12.2} = 1,23 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{12.3} = 1,143 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{12.4} = \frac{(2 \cdot 500 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,008$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100
квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{14.1} = 1,05 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{14.2} = 0,82 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{14.3} = \frac{(2 \cdot 450 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 0,914$$

$$\delta(\Delta P)_{14.4} = 1,008 \text{ (кВт)}.$$

- 4х100 квар ввімкнути в 1-му
вузлі;

- 6х100 квар ввімкнути в 2-му
вузлі;

- 3х100 квар ввімкнути в 3-му
вузлі;

- 2х100 квар ввімкнути в 4-му
вузлі.

Остаточні значення споживання
реактивних потужностей:

$$Q_1=400 \text{ (кВАр)}; \quad Q_2=250 \text{ (кВАр)};$$

$$Q_3=450 \text{ (кВАр)}; \quad Q_4=400 \text{ (кВАр)}.$$

Результати розрахунків показано на рисунку 2.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ЛЖ	Довжини	Питомі	Опір	Опір	Повні актив.	Реактивні нав.,	Пот.	Реактивні нав.					
2		ліній, м	активні опори	ЛЖ	ТП	опір	кавр	КУ,	з КУ, кавр					
3	ЖЛ	2000	0,122	0,244		0,244								
4	ТП1	500	0,208	0,104	1,060	1,164	800	400	400					
5	ТП2	600	0,208	0,125	1,900	2,025	850	600	250					
6	ТП3	400	0,208	0,083	1,060	1,143	750	300	450					
7	ТП4	300	0,208	0,062	1,060	1,122	600	200	400					
8	Разом						3000	1500	1500					
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														

	вузол 1	КУ, кавр	вузол 2	КУ, кавр	вузол 3	КУ, кавр	вузол 4	КУ, кавр
без КУ	1,75	0	3,27	0	1,6	0	1,23	0
1	1,75	0	2,86	100	1,6	0	1,23	0
2	1,75	0	2,45	100	1,6	0	1,23	0
3	1,75	0	2,05	100	1,6	0	1,23	0
4	1,75	0	1,64	100	1,6	0	1,23	0
5	1,51	100	1,64	0	1,6	0	1,23	0
6	1,51	0	1,23	100	1,6	0	1,23	0
7	1,51	0	1,23	0	1,37	100	1,23	0
8	1,28	100	1,23	0	1,37	0	1,23	0
9	1,28	0	1,23	0	1,14	100	1,23	0
10	1,05	100	1,23	0	1,14	0	1,23	0
11	1,05	0	1,23	0	1,14	0	1,01	100
12	1,05	0	0,82	100	1,14	0	1,01	0
13	1,05	0	0,82	0	0,91	100	1,01	0
14	0,82	100	0,82	0	0,91	0	1,01	0
15	0,82	0	0,82	0	0,91	0	0,78	100
Всього		400		600		300		200

Рисунок 2.7 - Забезпечення вхідної РП по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж

Порівняння:

Без КУ:

$$\sum \frac{Q_{i_{до}}^2}{U^2} \cdot R = \left(\frac{800^2}{10^2} \cdot 1,164 + \frac{850^2}{10^2} \cdot 2,0448 + \frac{750^2}{10^2} \cdot 1,143 + \frac{600^2}{10^2} \cdot 1,12 \right) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7,4496 + 14,77368 + 6,429375 + 4,032 = 32,685 \text{ (кВт)}.$$

З КУ:

$$\sum \frac{Q_{i_{після}}^2}{U^2} \cdot R = \left(\frac{400^2}{10^2} \cdot 1,164 + \frac{250^2}{10^2} \cdot 2,0448 + \frac{450^2}{10^2} \cdot 1,143 + \frac{400^2}{10^2} \cdot 1,12 \right) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,8624 + 1,278 + 2,314575 + 1,792 = 7,247 \text{ (кВт)}.$$

Таким чином сумарне зниження втрат складатиме:

$$\delta(\Delta P)_{\Sigma} = 32,685 - 7,247 = 25,438 \text{ (кВт)}.$$

2.10 Розрахунок оптимального керування потужностями КУ зі забезпеченням вхідної РП за алгоритмом максимуму зниження втрат для мереж з живлячою лінією

Розглянемо управління потужностями конденсаторних установок для радіальних мереж із живильною лінією, що забезпечує максимальне зниження втрат реактивної потужності. Аналітична модель має такий вигляд:

$$\frac{2Q_{ci}R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max. \quad (2.26)$$

Зниження втрат активної потужності в кожній вітці мережі визначається за третьою моделлю при ввімкненні секцій КУ в і-му вузлі з урахуванням живлячої лінії за формулою:

$$\delta(\Delta P)_i = \frac{2Q_{ci}R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2)R_i}{U^2}; \quad (2.27)$$

$$\delta(\Delta P)_{1,1} = \frac{(2 \cdot 3000 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 800 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 4 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1,2} = \frac{(2 \cdot 3000 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 850 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 5,53 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1,3} = \frac{(2 \cdot 3000 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 750 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1,4} = \frac{(2 \cdot 3000 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{2,1} = 4 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{2,2} = \frac{(2 \cdot 2900 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 750 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 5,04 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{2,3} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{2,4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{4,1} = 4 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{4,2} = \frac{(2 \cdot 2700 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 550 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 4,07 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{4,3} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{4,4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{3,1} = 4 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{3,2} = \frac{(2 \cdot 2800 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 650 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 4,554 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{3,3} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{3,4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{5,1} = 4 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{5,2} = \frac{(2 \cdot 2600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 450 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,584 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{5,3} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{5,4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{6.1} = \frac{(2 \cdot 2500 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 700 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{6.2} = 3,584 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{6.3} = 3,854 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{6.4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{8.1} = 3,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{8.2} = \frac{(2 \cdot 2300 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 350 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,946 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{8.3} = \frac{(2 \cdot 650 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143}{10^2} = 3,167 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{8.4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{10.1} = \frac{(2 \cdot 2100 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,846 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{10.2} = 2,946 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{10.3} = 3,167 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{10.4} = 2,651 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 2-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{12.1} = 2,846 \text{ (кВт)};$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{7.1} = 3,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{7.2} = 3,584 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{7.3} = \frac{(2 \cdot 2400 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 650 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 3,167 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{7.4} = 3,486 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 4-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{9.1} = 3,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{9.2} = 2,946 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{9.3} = 3,167 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{1.4} = \frac{(2 \cdot 2200 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 500 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,651 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{11.1} = 2,846 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{11.2} = 2,946 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{11.3} = \frac{(2 \cdot 2000 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 550 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,633 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{11.4} = 2,651 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{12.2} = \frac{(2 \cdot 1900 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 250 \cdot 100 - 100^2) \cdot 2,0448 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,231 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{12.3} = 2,633 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{12.4} = 2,651 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 4-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{14.1} = 2,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{14.2} = 2,231 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{14.3} = 2,633 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{14.4} = \frac{(2 \cdot 1700 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 400 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,045 \text{ (кВт)}.$$

$$\delta(\Delta P)_{16.1} = \frac{(2 \cdot 1500 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 400 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 1,923 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{16.2} = 2,231 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{16.3} = 2,098 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{16.4} = 2,045 \text{ (кВт)}.$$

$$\delta(\Delta P)_{13.1} = \frac{(2 \cdot 1800 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 500 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,164 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{13.2} = 2,231 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{13.3} = 2,633 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{13.4} = 2,651 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 3-му вузлі:

$$\delta(\Delta P)_{15.1} = 2,385 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.2} = 2,231 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.3} = \frac{(2 \cdot 1600 \cdot 100 - 100^2) \cdot 0,382 \cdot 10^{-3}}{10^2} + \frac{(2 \cdot 450 \cdot 100 - 100^2) \cdot 1,143 \cdot 10^{-3}}{10^2} = 2,098 \text{ (кВт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{15.4} = 2,045 \text{ (кВт)}.$$

Вмикаємо секцію КУ, потужністю 100 квар в 1-му вузлі:

- 4х100 квар ввімкнути в 1-му вузлі;

- 6х100 квар ввімкнути в 2-му вузлі;

- 3х100 квар ввімкнути в 3-му вузлі;

- 2х100 квар ввімкнути в 4-му вузлі.

$$Q_1 = 400 \text{ (кВАр)}; \quad Q_2 = 250 \text{ (кВАр)};$$

$$Q_3 = 450 \text{ (кВАр)}; \quad Q_4 = 400 \text{ (кВАр)}.$$

Остаточні значення споживання реактивних потужностей:

Результати розрахунків показано на рисунку 2.8.

Зниження втрат в магістральних електричних мереж промислових підприємства визначається формулою:

$$\delta(\Delta P)_i = \frac{(2 \cdot Q_i \cdot Q_{ci} - Q_{ci}^2) \cdot R_{ii}}{U^2} + \frac{1}{U^2} \cdot 2 \cdot Q_{ci} \cdot \sum_{j=1}^n Q_j \cdot R_{ji}, \quad (2.28)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ЛЖ	Довжини ліній, м	Питомі активні опори	Опір ЛЖ	Опір ТП	Повні актив. опір	Реактивні нав., кавр	Пот. КУ,	Реактивні нав. з КУ, кавр					
2	ЖЛ	2000	0,122	0,244		0,244								
3	ТП1	500	0,208	0,104	1,060	1,164	800	400	400					
4	ТП2	600	0,208	0,125	1,900	2,025	850	600	250					
5	ТП3	400	0,208	0,083	1,060	1,143	750	300	450					
6	ТП4	300	0,208	0,062	1,060	1,122	600	200	400					
7	Разом						3000	1500	1500					
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														

	вузол 1	КУ, кавр	вузол 2	КУ, кавр	вузол 3	КУ, кавр	вузол 4	КУ, кавр
без КУ	4	0	5,53	0	3,85	0	3,49	0
1	4	0	5,04	100	3,85	0	3,49	0
2	4	0	4,55	100	3,85	0	3,49	0
3	4	0	4,07	100	3,85	0	3,49	0
4	4	0	3,58	100	3,85	0	3,49	0
5	3,39	100	3,58	0	3,85	0	3,49	0
6	3,39	0	3,58	0	3,17	100	3,49	0
7	3,39	0	2,95	100	3,17	0	3,49	0
8	3,39	0	2,95	0	3,17	0	2,65	100
9	2,85	100	2,95	0	3,17	0	2,65	0
10	2,85	0	2,95	0	2,63	100	2,65	0
11	2,85	0	2,23	100	2,63	0	2,65	0
12	2,39	100	2,23	0	2,63	0	2,65	0
13	2,39	0	2,23	0	2,63	0	2,05	100
14	2,39	0	2,23	0	2,1	100	2,05	0
15	1,92	100	2,23	0	2,1	0	2,05	0
Всього		400		600		300		200

Рисунок 2.8 - Забезпечення вхідної РП по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з живлячою лінією

Також зниження втрат можна розрахувати як:

$$\delta(\Delta P)_i = A_i \cdot Q_i - B_i + \sum_{j=1}^n C_j Q_j, \quad (2.29)$$

де Q_i – реактивне навантаження і-ого вузла;

Q_{ci} – потужність секції КУ, встановленої в і-ому вузлі;

R_{ii} – вхідний активний опір і-ого вузла;

R_{ji} – спільний активний опір для j-ого та і-ого вузлів;

U_H – номінальна напруга мережі; n – кількість вузлів в мережі; $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, n$.

$$A_i = \frac{2 \cdot Q_{ci} \cdot R_{ii}}{U^2}; \quad B_i = \frac{Q_{ci}^2 \cdot R_{ii}}{U^2}; \quad C_j = \frac{2 \cdot Q_{ci}}{U^2} \cdot R_{ji}.$$

Як видно з попередніх формул, у другому способі не враховується зниження втрат $\sum_{j=1}^n C_j Q_j$, що може призвести до неправильного вибору секції КУ для максимального зниження втрат.

Задача вирішується шляхом введення нових зв'язків в автоматичний регулятор КУ між масштабними підсилювачами та датчиками реактивної потужності через систему розподільчих шин (рисунок 2.2). Це дозволяє формувати сигнали, пропорційні максимальному зниженню втрат у магістральній мережі, що забезпечує правильне вмикання секцій КУ і досягнення найбільшого зниження втрат електроенергії.

В таблиці 2.6 представлено порівняння раніше розрахованих методів.

Таблиця 2.6 – Порівняльна таблиця методів забезпечення вхідної РП

Метод 1 - Забезпечення в.р.п. по мінімуму втрат мереж окремого дерева		$Q_i^2 R_i \rightarrow \min$			
Х-ки	Вузли	1	2	3	4
	К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200
	Втрати активної потужності до встановлення КУ ΔP , кВт	7,45	14,77	6,429	4,032
	Втрати активної потужності після встановлення КУ ΔP , кВт	1,862	1,278	2,315	1,792
Метод 2 - Забезпечення в.р.п. по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж		$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$			
	К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200
	Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	1,746	3,27	1,6	1,232
	Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	0,815	0,82	0,914	0,784
Метод 3 - Забезпечення в.р.п. по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з живлячою лінією		$\frac{2Q_{ci} R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$			
	К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200

Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	4	5,526	3,854	3,4858
Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	1,923	2,231	2,098	2,045

Аналіз таблиці 2.2 показує, що результати керування КУ для різних моделей ідентичні через однакові сумарні втрати на всіх етапах. Це описується формулою:

$$\delta P_{\Sigma} = \delta P_{\text{відгал.}} + \delta P_{\text{жм}} + \delta P_{\text{спільн.}}, \quad (2.30)$$

де $\delta P_{\text{відгал.}}$ - зниження втрат у відгалуженнях від основної лінії живлення;

$\delta P_{\text{жм}}$ - зниження втрат у живлячій лінії;

$\delta P_{\text{спільн.}}$ - зниження втрат в лініях, що є спільними для вузлів.

У радіальних мережах промислових підприємств мінімізація втрат $\delta P_{\text{відгал.}} \rightarrow \min$ відбувається шляхом вибору оптимальних секцій включення КУ. Управління виконується за принципом мінімальних втрат, залежно від потужності секції та вузла, що керується.

У дослідженні встановлено, що методи забезпечення заданої реактивної потужності при мінімальних втратах активної потужності демонструють однакові результати незалежно від обраної моделі керування, оскільки всі моделі мають спільну складову зниження втрат. Це дозволяє ефективно керувати реактивними потоками схеми, використовуючи лише часткові дані, що знижує витрати на створення системи управління. Крім того, встановлення конденсаторних установок у розподільних мережах не лише зменшує втрати активної потужності в самих мережах, а й значно знижує втрати у живильних лініях, підвищуючи загальну енергоефективність.

2.11 Висновки по розділу 2

В даному розділі кваліфікаційної роботи проведений загальний аналіз методів керування пристроями КРП.

1. Досліджено два підходи до розробки методів керування пристроїв КРП. Перший спосіб орієнтований на параметри електричної мережі (напруга, струм, час тощо) і забезпечує безпосереднє керування компенсацією відповідно до стану мережі. Другий спосіб орієнтується на типи контролю і способи організації управління, що задіє різні рівні автоматизації, централізації і залежності від оператора.

2. Наведено математичні моделі керування пристроями БСК, та здійснено опис випадків їх використання.

3. Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП. Запропонований метод КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання РП.

4. Проаналізовано методи керування пристроями СТК. Досліджено систему керування СТК від компанії АВВ.

5. Були розглянуті методи забезпечення заданої вхідної реактивної потужності при мінімумі втрат активної потужності. Встановлено, що послідовність вмикання секцій КУ в усіх вузлах з метою забезпечення заданої вхідної реактивної потужності 1500 квар для підприємства, визначена за допомогою різних моделей керування потужностями конденсаторних установок, є однаковою. Це зумовлено тим, що всі моделі мають спільну складову зниження втрат, яка найбільше впливає на управління секціями КУ. Отже, можна керувати реактивними потоками всієї схеми, використовуючи лише дані про її частину. Це дасть змогу знизити затрати на створення системи управління компенсуючими установками.

В цілому показано, що дослідження методів керування пристроїв КРП є актуальною темою. Рішення проблем в даній тематиці дозволяє досягти оптимальнішої роботи уже існуючих електричних мереж шляхом ефективнішої роботи пристроїв КРП так і оптимальнішої роботи електричних мереж які знаходяться на стадії проектування.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ СТК

3.1 Аналіз методу керування СТК

В [18] запропоновано компенсатор реактивної потужності, що складається з тиристорно-реакторної схеми ТРК, активного фільтру та регулятора Р (рис. 3.1). Тиристорно-реакторна схема КРП складається з послідовно з'єднаних дроселів $L1...L3$. $L3$ та обернено паралельно з'єднаних тиристорів $VS1... VS3$, які утворюють трикутну схему з'єднання. Трифазний силовий фільтр SF складається з послідовно з'єднаних конденсаторів $C1... C3$ і фільтруючих реакторів $L4... L6$ утворюють три контури, з'єднані в конфігурації "зірка".

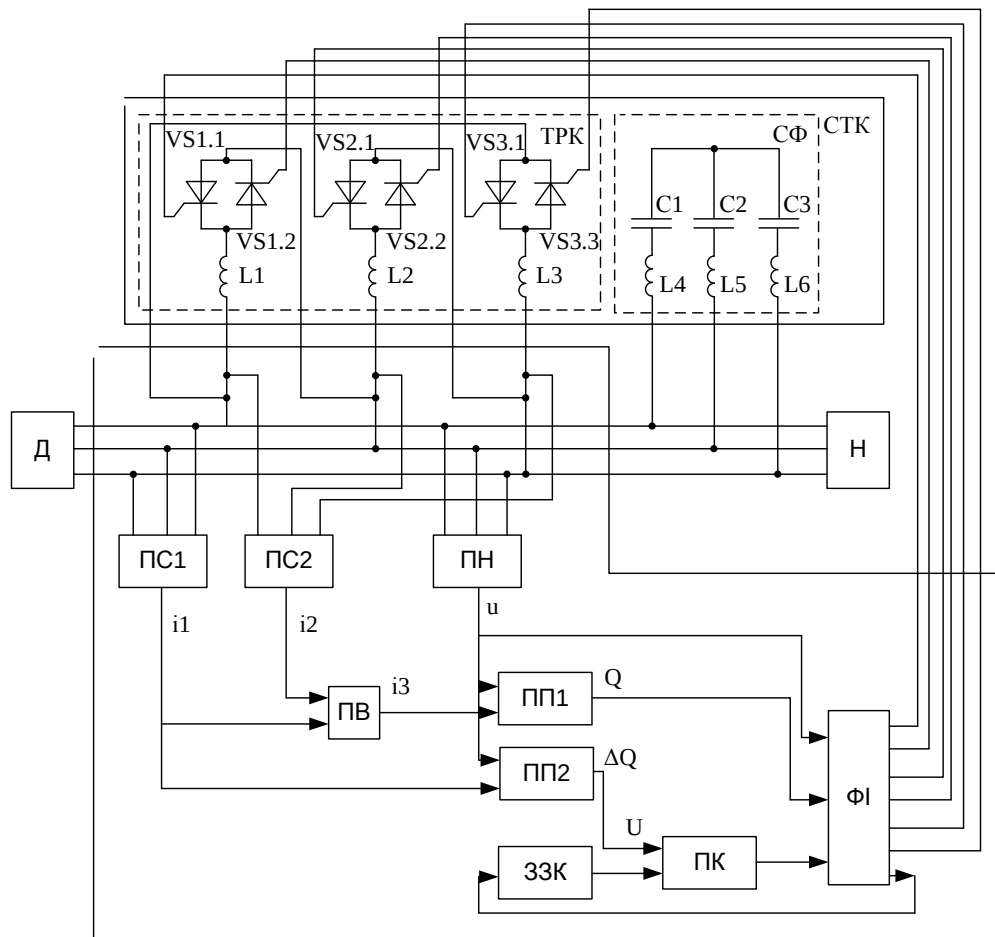


Рисунок 3.1 – Пристрій СТК

Пристрій СТК має контур керування тиристорно-реакторною групою компенсатора. Блок управління Р складається з вимірювального каналу та системи імпульсного фазового керування. Вимірювальний канал складається з вимірювального перетворювача напруги VC , що містить три однофазні

трансформатори напруги, двох вимірювальних перетворювачів струму. Система імпульсного фазового керування складається з компенсатора ПК, визначника зони регулювання ЗЗК і формувача трифазних імпульсів ФІ.

Робота пристрою полягає в наступному: кожен трифазний активний фільтр компенсатора СТК відводить струми вищих гармонік зі спектра навантаження Н і тиристорно-електричного кола (ТРК) на частоті, на яку він налаштований, а конденсатори силового фільтра $C1...C3$ є джерелами реактивної потужності. СТК У компенсаторі кожна фаза тиристорно-реакторної схеми ТРК, $L1....L3$ компенсуючого реактора, відповідний тиристор $VS1...VS3$ вмикаються, подається відповідна мережева напруга. Кут керування γ тиристорів розраховується від позитивного максимуму анодної напруги тиристора і змінюється від нуля до $\pi/2$.

$$Q = \frac{U_{\max}^2}{2\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right). \quad (3.1)$$

де $U_{\max}$ – амплітуда лінійної напруги.

Реактивна потужність компенсатора СТК залежить від кута керування тиристорів $VS1...VS3$. Керування фазами тиристорно-реакторного кола ТРК виконується згідно з інтегральними виразами:

$$\begin{aligned} Q_{AB} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\int_{t_n}^{t_n+T/2} (U_{BC}i_{3A} + U_{CA}i_{3B} + U_{AB}i_{3C}) dt}{T/2}, \\ Q_{BC} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\int_{t_n+T/6}^{t_n+2T/3} (U_{CA}i_{3B} + U_{AB}i_{3C} + U_{BC}i_{3A}) dt}{T/2}, \\ Q_{CA} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\int_{t_n+T/3}^{t_n+5T/6} (U_{AB}i_{3C} + U_{BC}i_{3A} + U_{CA}i_{3B}) dt}{T/2}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

де t_n – момент максимуму півхвиль лінійної напруги.

3.2 Цифрова модель для керування пристроєм СТК

Оскільки компенсатори працюють при досить високих струмах і напругах, а вартість їх основних елементів досить висока, корисно вивчити режим роботи за допомогою математичних або комп'ютерних моделей, перш ніж приступати до реальних випробувань.

Сучасні системи курування конденсаторних установок мають різноманітні функції і дозволяють повністю інтегруватися в цифрову систему. На рисунку 3.2 показана схема блоку курування, що включає в себе різні функції курування і замкнуту петлю зворотного зв'язку [12].

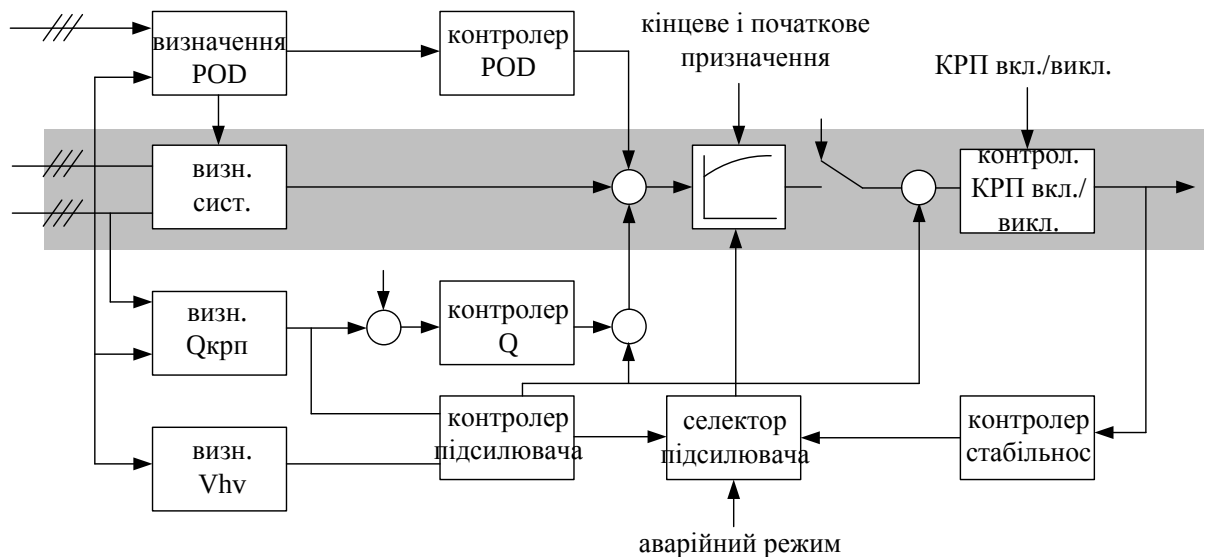


Рисунок 3.2 – Схема блоку методів курування СТК

Виділена на рисунку частина схеми показує проходження сигналу управління напругою. Сигнал управління напругою може бути модульований швидкодіючим сигналом управління для усунення коливань потужності (POD) в разі серйозних проблем зі стабільністю роботи після аварії системи.

Обчислення миттєвих значень компенсаційного струму $i_c(t)$ відбувається за формулою:

$$i_c(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot u(t) - i(t); \quad (3.3)$$

де $u(t)$ - миттєві значення напруги (U_{netw});

$i(t)$ - миттєві значення струму навантаження (I_{load});

T - період напруги.

На рисунку 3.3 зображена схема СТК, яка має три ступені регулювання $C1=C2=C3$, які підключається до трифазної мережі через струмообмежувальний реактор L_0 і тиристорний вимикач $VS1$, конденсатори якого з'єднані трикутником. Тиристорний вимикач $VS1$ розміщений тільки на двох фазах, що зменшує втрати потужності в розподільчому пристрої на $1/3$.

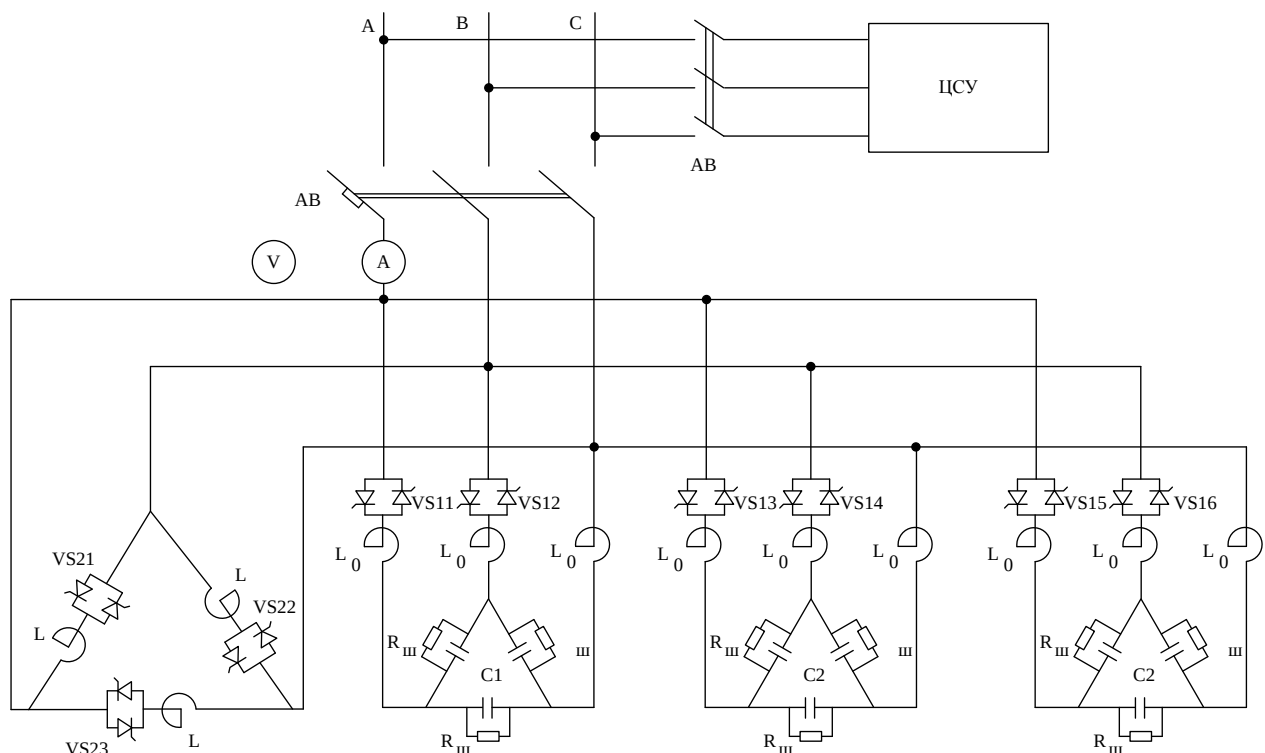


Рисунок 3.3 – Принципова схема СТК

Втрати потужності в мережі підприємства визначаються за виразом:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_E}{U} \right)^2 + \left(\frac{Q_E}{U} \right)^2 \right] \cdot R_E = \Delta P_a + \Delta P_p. \quad (3.3)$$

де ΔP_a - втрати активної потужності;

ΔP_p - втрати реактивної потужності;

R_E - еквівалентний активний опір мережі;

P_E , Q_E , U - параметри режиму.

На рисунку 3.4 зображено модель регульованого джерела реактивної потужності в середовищі MATLAB.

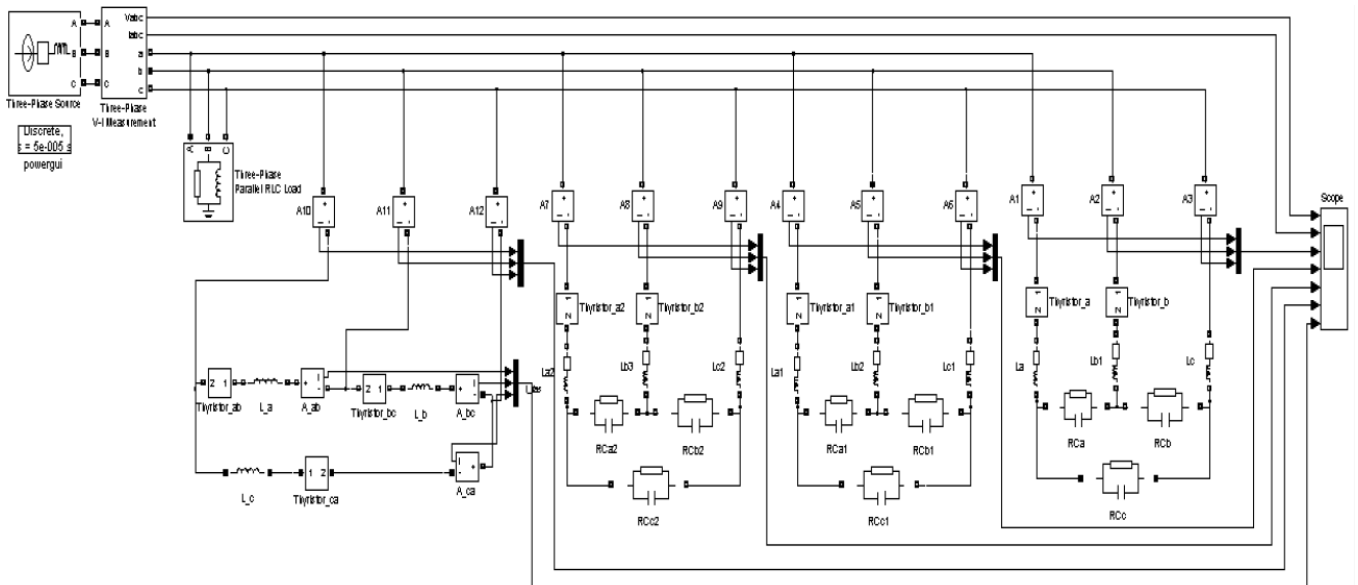


Рисунок 3.4 – Модель СТК

Модель має структуру, що складається з декількох підсистем: підсистеми, що моделює мережу, силову частину компенсатора, його систему керування та навантаження. Загальний вигляд моделі представлений на рисунку 3.5, схема компенсатора на рисунку 3.6.

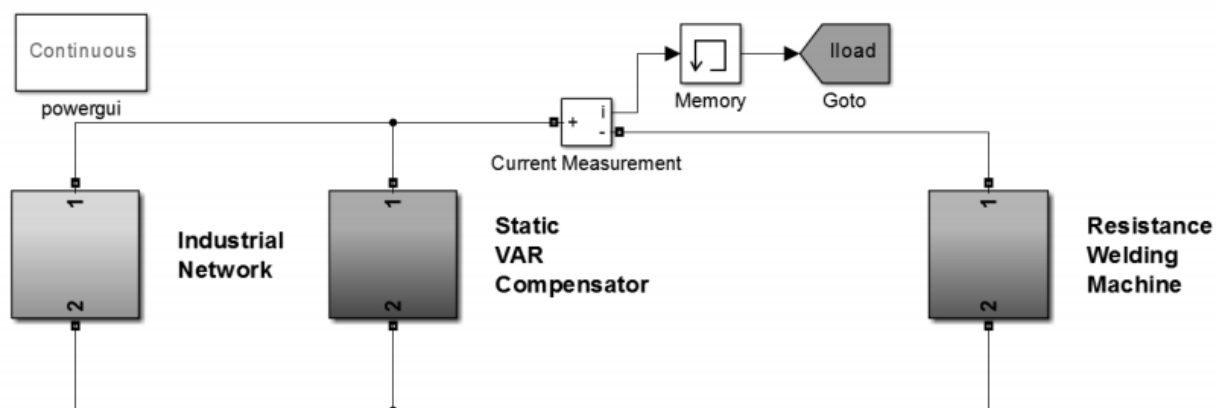


Рисунок 3.5 – Модель системи мережа - компенсатор – навантаження

На рисунку 3.6 показана силова частина компенсатора.

3.3 Моделювання основних режимів роботи СТК

Параметри компенсатора були обрані на основі електромагнітної сумісності з реальною електричною мережею та можливості фізичної реалізації. Реактивний опір компонентів компенсатора розраховується виходячи з необхідних значень коливань струму і напруги та тривалості перехідних процесів, при цьому ефективний опір мінімізується [14].

Величина активних втрат елемента перетворювача становить менше 1% від його загальної потужності, тому при моделюванні електромагнітного процесу втратами можна знехтувати. Фазні реактори, конденсаторні батареї та обмотки перетворювача в моделі перетворювача представлені ідеальними електричними елементами: індуктивністю, ємністю та ідеальними провідниками [20].

Робота моделі СТК була перевірена на змінному графіку навантаження електричної мережі промислового підприємства. Аналіз графіка навантаження, наведеного на рисунку 3.8, показав, що реактивна потужність носить індуктивний характер. Величина споживаної реактивної потужності за одну зміну змінювалася від 7 до 29,6 квар.

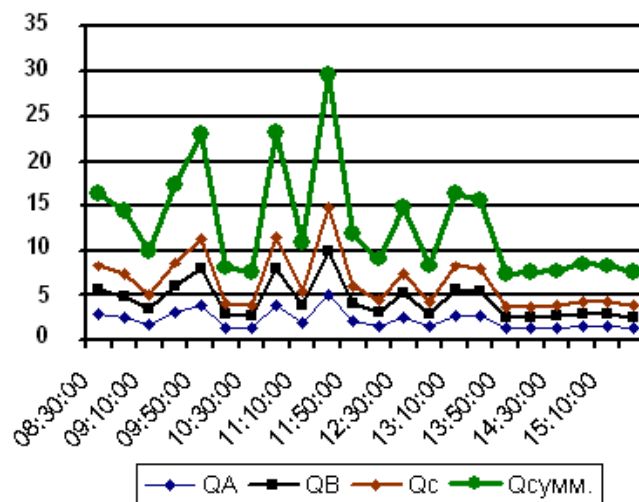


Рисунок 3.8 – Графік узла навантаження до КРП за допомогою СТК

При підключенні до мережі СТК потужністю 75 квар на напругу 380 В споживання реактивної потужності зменшилася на 25 квар при максимальному навантаженні 29,6 квар, що відповідає автоматичному підключенню чотирьох

ступенів джерела реактивної потужності, кожна з яких 6,25 квар. При мінімальному навантаженні (7,434 квар) автоматично підключається лише одна ступінь, це впливає з графіка рисунок 3.9. Результати дослідження показали, що параметри СТК обрані правильно.

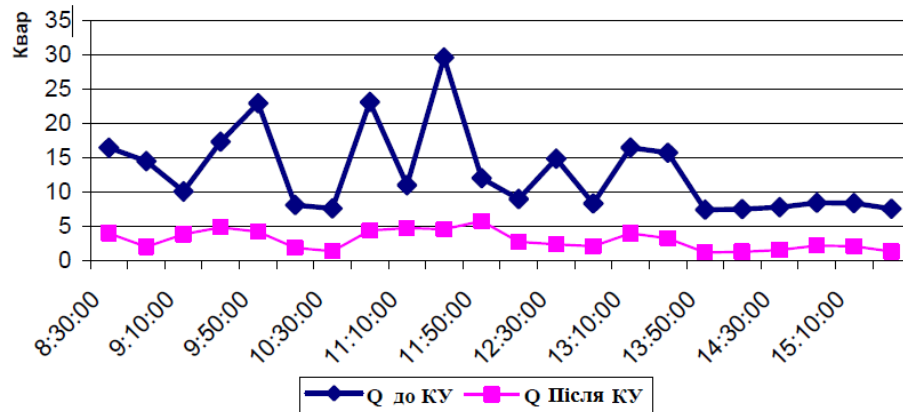


Рисунок 3.9 – Графік вузла навантаження до і після установки СТК

Достовірність роботи моделі СТК підтверджується зміною реактивної потужності навантаження тільки для одного прийнятого її значення рисунок 3.10.

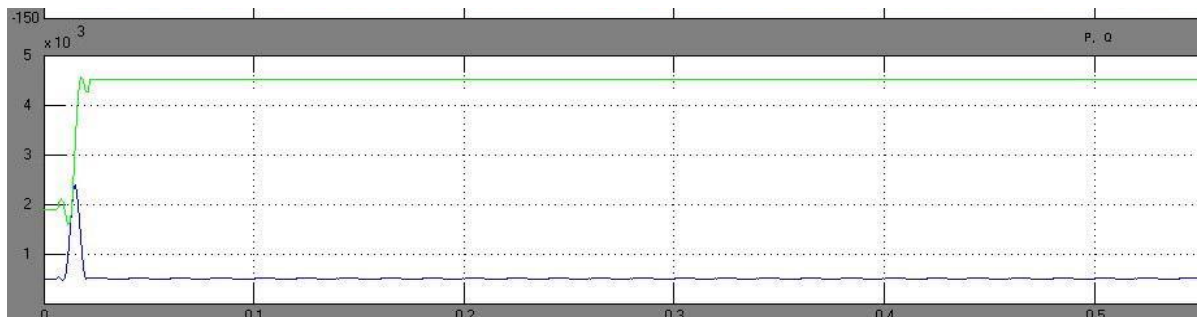


Рисунок 3.10 – Графіки зміни реактивної потужності при підключенні одного ступеня джерела реактивної потужності

На рисунку 3.11 а), б) представлені часові графіки миттєвих значень лінійних напруг U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} до та після включення СТК відповідно. На рисунку 3.3 в) показано графік зміни реактивної потужності СТК $Q_{ст}$ (у квар).

З розгляду рисунку 3.11 б) видно, що при увімкненому СТК «провали» напруг і «тимчасові перенапруги» стають значно меншими порівняно з наведеними на рисунку 3.11 а), що свідчить про ефективність роботи СТК цього типу.

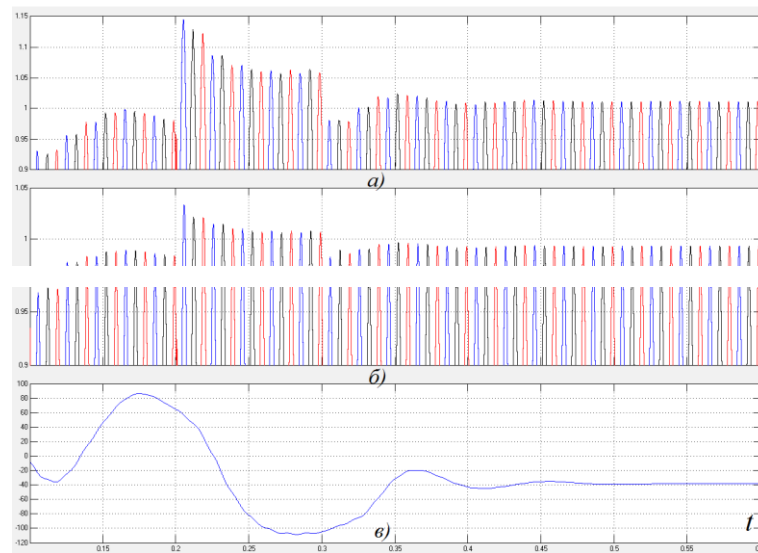


Рисунок 3.11 – Часові залежності миттєвих значень лінійних напруг
а), б) часові графіки миттєвих значень лінійних напруг U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} до та після включення СТК відповідно. в) графік зміни РП СТК $Q_{ст}$ (у квар)

На рисунку 3.12 представлені криві, відповідні режиму споживання номінальної РП перетворювачем в умовах симетричної мережі. Верхня діаграма показує криву фазного струму інвертора. Нижній графік показує лінійну напругу між інвертором і мережею. Перша гармоніка напруги інвертора нижча за напругу мережі, що відповідає режиму споживання реактивної потужності. Відносна похибка модуляції струму рівна $\approx 0,4\%$.

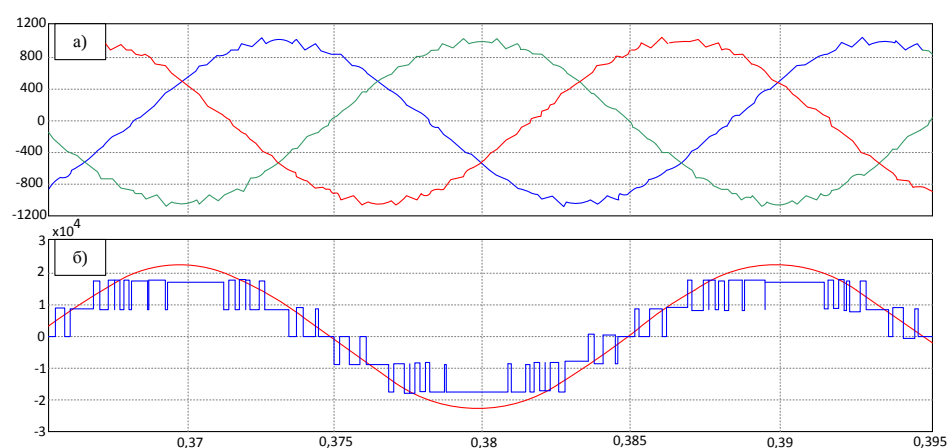


Рисунок 3.12 – Режим споживання номінальної реактивної потужності
а) фазні струми; б) лінійна напруга перетворювача
(синій колір) і лінійну напругу мережі (червоний колір)

3.4 Висновки по розділу 3

1. В даному розділі МКР розроблено модель пристрою СТК для КРП з використанням засобів MatLAB, Simulink, і toolbox Sim Power Systems. Розроблена модель дозволяє проводити дослідження режимів роботи СТК в електричних мережах зі змінним навантаженням.

2. Досліджено різні режими роботи СТК на отриманій моделі з метою налаштування цифрової системи управління при різних змінних графіках навантажень споживачів електричної енергії.

3. Автоматичне керування пристроями КРП дозволяє підтримувати необхідні параметри електричної мережі на заданому рівні протягом всієї роботи обладнання, стабілізуючи таким чином робочі параметри. Крім того, система автоматичного керування виконує функції пуску і захисту. Система автоматичного керування також має функцію аварійної зупинки ланцюга в разі перевищення допустимих параметрів струму. Система сигналізує про несправність у всіх режимах роботи.

4. Розробка та впровадження передових методів керування пристроями компенсації реактивної потужності є важливим завданням для електричних мереж промислових підприємств. Сучасні методи автоматизації та моделювання, можуть істотно підвищити ефективність роботи мереж і покращити якість електроенергії, що постачається. Шляхом рішення оптимізаційних задач за допомогою математичних моделей, які здатні відтворювати основні властивості реальних електричних мереж.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Вступ

Даний розділ присвячений реалізації першого етапу стартап-проекту [21], а саме висвітленню маркетингових аспектів створення стартапу: відбору ідей, створенню концепції продукту, визначення перспектив ринкової реалізації проекту та розробленню маркетингової стратегії. У розділі виконується оцінювання можливостей та формування заходів із ринкового впровадження інноваційних пропозицій магістра.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатності щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині роботи.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

4.2 Оцінка ефективності КРП

Безпосередньо ефективність інвестицій (інвестиційних проектів) у ринкових умовах господарювання характеризує система показників, що охоплює:

- 1) чистий приведений дохід (чисту теперішню чи майбутню приведену вартість);
- 2) індекс дохідності (прибутковості, рентабельності) інвестицій;
- 3) термін окупності інвестицій;
- 4) внутрішню норму дохідності.

Показник чистого приведенного доходу (NPV) дає узагальнену характеристику

результату інвестування — абсолютну величину ефекту від реалізації певного інвестиційного проекту.

NPV являє собою дисконтовану цінність проекту (поточну вартість доходів або вигід від зроблених інвестицій). Чиста теперішня вартість проекту - це різниця між величиною грошового потоку, дисконтованого за прийнятною ставки дохідності і сумою інвестицій.

Для розрахунку NPV проекту необхідно визначити ставку дисконту, використати її для дисконтування потоків витрат та вигід і підсумувати дисконтовані вигоди й витрати (витрати зі знаком мінус).

При проведенні фінансового аналізу ставка дисконту, звичайно, є ціною капіталу для фірми. В економічному аналізі ставка дисконту являє собою закладену вартість капіталу, тобто прибуток, який міг би бути одержаний при інвестуванні найприбутковіших альтернативних проектів.

Якщо NPV позитивна, то проект можна рекомендувати для фінансування. Якщо NPV дорівнює нулю, то надходжень від проекту вистачить лише для відновлення вкладеного капіталу.

Якщо NPV менша нуля - проект не прийметься.

Під час оцінювання ефективності реальних інвестицій він є основним (критеріальним) і залежно від конкретної ситуації (необхідності обчислення чистої теперішньої чи майбутньої вартості) визначається з однієї з двох формул, грн:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+k)^t} - I \quad (\text{грн.}), \quad (4.1)$$

де CF_t — грошовий потік i -го розрахункового року (вигоди проекту в рік t);

I_t — сума інвестицій i -го розрахункового року (витрати на проект у рік t);

t — тривалість інвестиційного періоду;

k — коефіцієнт дисконтування = 0,1.

I — разові інвестиції, грн:

$$I = (B_{k0} + B_{k0} \cdot E_m) \cdot \sum_{i=1}^n q_{ki} \quad (\text{грн.}),$$

$CF_i - I_i$ - чиста грошова економія:

$$CF_i - I_i = E_{\Sigma} - ((E_e + E_a) \cdot B_{k0} + t \cdot \tau \cdot \Delta P_k) \cdot \sum_{i=1}^n q_{ki} \text{ (грн)},$$

або:

$$NPV = \sum_{i=1}^n CF_i \cdot DM_i - \sum_{i=1}^n I_i \cdot DM_i \text{ (грн.)}, \quad (4.2)$$

де DM_i — дисконтний множник (коефіцієнт приведення i -го року).

Основна перевага NPV полягає в тому, що всі розрахунки проводяться на основі грошових потоків; а не чистих доходів. Окрім того, ефективність головного проекту можна оцінити шляхом підсумовування NPV його окремих підпроектів. Це дуже важлива властивість, яка дає змогу використовувати NPV як основний критерій при аналізі проекту.

Основним недоліком NPV є те, що її розрахунок вимагає детального прогнозу грошових потоків на термін життя проекту. Часто робиться припущення про постійність ставки дисконту.

Індекс дохідності (PI) у методичному аспекті є схожим на використовуваний раніше показник «коефіцієнт ефективності капітальних вкладень». Проте в цьому разі доходом є не прибуток, а грошовий потік (ГП) стосовно інвестованих коштів (I), приведених за умови різночасності до теперішньої або ж майбутньої вартості. Індекс прибутковості - Profitability Index є відношенням суми наведених ефектів (різниця вигід і поточних витрат) до величини інвестицій. Виокремлений показник характеризує не абсолютну, а відносну ефективність інвестицій і розраховується за формулою:

$$PI = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{CF_i - I_i}{(1+k)^t}, \quad (4.3)$$

PI тісно пов'язаний із NPV. Якщо NPV позитивна, то й $PI > 1$, і відповідно, якщо $PI > 1$, проект ефективний, якщо $PI < 1$ - неефективний.

Термін окупності інвестицій (РВР) як показник їхньої ефективності також ґрунтується на дисконтованій величині грошового потоку. Термін окупності проекту

- Payback Period (PBP) використовується переважно в промисловості. Це один із найбільш часто вживаних показників оцінки ефективності капітальних вкладень.

На відміну від показників, які використовуються у вітчизняній практиці, показник «термін окупності капітальних вкладень» базується не на прибутку, а на грошовому потоці з приведенням коштів, які інвестуються в інновації та суми грошового потоку до теперішньої вартості. Критерій прямо пов'язаний із відшкодуванням капітальних витрат у найкоротший період часу і не сприяє проектам, які дають великі вигоди лише згодом. Він не може слугувати за міру прибутковості, оскільки грошові потоки після терміну окупності не враховуються.

Найточніше його можна розрахувати так:

$$PBP = m + \frac{\sum_{i=1}^n I_i - S_m}{CF_{m+1}} \quad (\text{років}) \quad (4.4)$$

де m — кількість років, протягом яких сума дисконтованого грошового потоку наближається, але не перевищує дисконтованих інвестицій.

$$S_m < I_i < S_{m+1},$$

де I_i — сума дисконтованих грошових потоків за m років;

CF_{m+1} — дисконтований грошовий потік у році $m + 1$.

S_m — нарощена сума дисконтованих грошових потоків за m років;

Внутрішня норма рентабельності - Internal Rate of Return (IRR) у літературі зустрічаються й інші назви: внутрішня ставка рентабельності, внутрішня ставка доходу, внутрішня норма прибутковості. Це рівень ставки дисконтування, при якому чиста приведена вартість проекту за його життєвий цикл дорівнює нулю. IRR проекту дорівнює ставці дисконту, при якій сумарні дисконтовані вигоди дорівнюють сумарним дисконтованим витратам, тобто IRR є ставкою дисконту, при якій NPV проекту дорівнює нулю. IRR дорівнює максимальному проценту за позиками, який можна платити за використання необхідних ресурсів, залишаючись при цьому на беззбитковому рівні. Розрахунок IRR проводиться методом послідовних наближень величини NPV до нуля за різних ставок дисконту.

На практиці визначення IRR проводиться за допомогою такої формули:

$$IRR = A + \frac{a \cdot (B-A)}{(a-b)}, \quad (4.5)$$

де A - величина ставки дисконту, при якій NPV позитивна;

B - величина ставки дисконту, при якій NPV негативна;

a - величина позитивної NPV, при величині ставки дисконту A ;

b - величина NPV, при величині ставки дисконту B .

Коефіцієнт вигід/витрат - Benefit/Cost Ratio (BCR). BCR є відношенням дисконтованих вигід до дисконтованих витрат.

Основна формула розрахунку має такий вигляд:

$$BCR = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^t}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_i}{(1+k)^t}}, \quad (4.6)$$

Критерій відбору проектів полягає в тому, щоб вибрати всі незалежні проекти з коефіцієнтами BCR, більшими або рівними одиниці.

4.3 Опис ідеї

Діюча методика оплати за перетікання реактивної енергії в електричній мережі електропередавальних організацій до промислових та непромислових споживачів, створена на основі техніко-економічних витрат, через виникнення додаткових витрат при передачі активної електроенергії. Згідно цієї методики оплата здійснюється при використанні економічного еквівалента реактивної потужності, використання в даній системі оплати ЕЕРП не демонструє фактичних витрат активної електроенергії, в наслідок цього розрахунок оплати за передавання реактивної потужності є неточним [21].

Головним завданням визначення плати є точне компенсування витрат електропередавальних організацій і точне визначення прибутку компанії за надані послуги з передавання реактивної енергії [10].

Дослідження в технічній частині роботи ефективності використання методики оплати з використанням кусочно-лінійної апроксимації може слугувати інструментом

для визначення місць розміщення компенсуючих пристроїв з втрат електричної енергії.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувачів
Впровадження системи оплати з використанням кусочно-лінійної апроксимації у в мережі 0,4-10 кВ.	Оператори системи передачі електроенергії, оператори системи розподілу електроенергії	Отримання більш точної вартості електроенергії
	Споживачі електроенергії	Інструмент для більш точного розрахунку вибору місць встановлення компенсуючих пристроїв

Реактивна потужність, створена індуктивними споживачами циркулює по електричній мережі і призводить до збільшення втрат активної енергії та не являється товарним продуктом. РП впливає на економічні показники електроенергетичної системи, тому питання з уточнення системи оплати передачі реактивної потужності залишається відкритим.

4.4 Технологічний аудит ідеї проекту

Основні задачі розділу:

Вибір електроенергетичного об'єкту, для якого актуальне покращення характеристик мережі в результаті встановлення пристроїв з використанням кусочно-лінійної апроксимації.

Аналіз характерного режиму: загальні характеристики конфігурація мережі розрахунок плати за передавання реактивної енергії та інші.

Визначення економічно доцільних місць встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності в розподільчій мережі, та зниження плати за перетікання реактивної енергії в наслідок її компенсації.

Оцінка економічної ефективності рішень, запропонованих рішень.

Для розрахунку режимів роботи було обрано лінію «ПЛ-10 Л-2 ПС-110/10 Сорока». Визначено місце встановлення компенсуючих пристроїв та їх потужності.

У випадку зацікавленості оператора у зниженні втрат даної мережі реалізацію проекту можна представити у трьох наступних позиціях [21]:

Узгодження місця встановлення БСК з диспетчером та технологічними службами, оператором з розподілення електроенергії. Визначення конструктивних можливостей ТП, зручності обслуговування персоналом або оперативно-виїзними бригадами. Дорозрахунок, дооптимізація і нова оцінка ефективності.

Залучення до роботи відповідної ліцензованої проектною організацією, яка забезпечує розробку офіційної проектно-технічної документації та інші. Необхідна взаємодія з організацією.

Залучення промислових споживачів, які платять за перетоки реактивної енергії, що знаходяться у сфері дії БСК, у яких плата РЕ буде зменшена у зв'язку зі зміною $\text{tg}\phi$ до участі у фінансуванні проекту. Необхідна оцінка рівня зниження плати і відповідне економічне обґрунтування.

4.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати протягом ринкового впровадження проекту, ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту з урахування стану ринкового середовища і потреб потенційних клієнтів.

Таблиця 4.2 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	0
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1
3	Динаміка ринку	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу	Мінімальний рівень первинних інвестицій
5	Специфічні умови до стандартизації та сертифікації	ДСТУ 1255-93
6	Середня норма рентабельності галузі	90%

Важливим аспектом вдалого залучення продукту на ринок є аналіз потенційних груп клієнтів, їх вимоги до товару, так як орієнтуючись на них клієнт здобуде свою клієнтську базу

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів.

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Стимулювання до компенсації реактивної потужності	Енергопостачальні компанії, споживачі електроенергії	Конфігурація КРП під конкретний об'єкт	Адаптивність, надійність, простота, ефективність, відносна дешевизна

Таблиця 4.4 – Фактор загрози

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
Складне економічне становище в країні	Зменшення попиту у зв'язку з необхідними витратами	Зниження попиту
Необізнаність	Малий рівень компетенції у питаннях компенсації реактивної потужності	

Таблиця 4.5 – Фактор можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
Підтримка	Подальше обслуговування після реалізації	Зростання зацікавленості
Зростання попиту на енергозбереження	Заощадження грошових коштів при споживанні електроенергії	

Крайнім етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT (аналіз сильних та слабких сторін, загроз та можливостей).

Таблиця 4.6 – SWOT- аналіз

Сильні сторони: індивідуальний підхід до енергосистем, швидкість і відносна простота розрахунків, мала ймовірність здійснення помилки.	Слабкі сторони: відсутні
Можливості: зниження втрат електроенергії, зниження плати за передачу реактивної енергії, впровадження нових технологій у сфері енергетики	Загрози: сповільнення розширення ринку електроенергії, невелика кількість клієнтів, конкуренція

Потенційними клієнтами можуть стати енергопостачальні компанії з споживачами низької напруги в тариф яких не входить оплата за реактивну електроенергію, та споживачі в тариф яких входить оплата за реактивну електроенергію з ціллю зменшення втрат при компенсації.

4.6 Розроблення ринкової стратегії стартап проекту

Таблиця 4.7 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Цільових груп потенційних клієнтів	Готовність споживачів до прийняття продукту	Орієнтований попит в межах цільових груп	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Електропередавальні організації	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
Проектні організації	Повна готовність	Високий	Помірна	Складно
Обслуговуючі компанії	Повна готовність	Високий	Помірна	Помірно
Підприємства	Часткова готовність	Високий	Помірна	Просто
Державні органи влади	Низька готовність	Низький	Висока	Складно

Виходячи з даного аналізу було прийнято стратегію з збільшення своєї частки ринку, мета якої полягає у подальшому підвищенні прибутковості компанії за

рахунок зменшення витрат на виробництво в результаті чого збільшується обсяг виробництва

4.7 Розроблення маркетингової програми стартап проекту

Першим кроком під час формування маркетингової програми є створення маркетингової концепції товару.

Таблиця 4.8 – Визначення переваг концепції потенційного товару.

Потреба	Вигода яку пропонує товар	Ключові переваги
Методи вибору місць розміщення компенсуючих пристроїв з урахуванням нелінійності втрат електричної енергії	Відносна дешевизна, точність, зменшення втрат енергії	Точність розрахунків, місць встановлення КРП

Розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів

Таблиця 4.9 – Концепції маркетингових комунікацій.

Специфікація поведінки нових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Пошук збільшення точності оплати за реактивну енергію	Інтернет ресурси, реклама	Ціна функціональності	Введення технологій на ринок контролю якості, надання інформації про товар	Якість, простота, залучення до технічного процесу

На даному ринку клієнти порівнюють переваги та рентабельність які можуть надати їм товари, оскільки кількість фірм які пропонують дану послугу досить велика, то особлива увага приділяється новинкам, що з'являються на зміну існуючим продуктам. Спираючись на це існує підґрунтя для комерціалізації даного проекту.

Висновки по розділу:

1 В даному розділі проведено аналіз стартап проекту, було продемонстровано технічну сторону питання та доцільність проекту, аналіз ринкових можливостей показав, представлена методика орієнтована на широку аудиторію ринку енергетики і є вигідною для всіх груп споживачів.

2. Компенсація реактивної потужності є найдешевшим і ефективним засобом підвищення техніко-економічних показників електропостачання, який зменшує всі види втрат електроенергії.

3. Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що оптимальне управління пристроями КРП може зменшити втрати активної потужності, підвищити рівень напруги в вузлах та покращити параметри мережі.

4. Технічні рішення з КРП, отримані за розробленими в роботі математичними моделями для умов одного з реальних виробництв, характеризуються високими економічними показниками.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В даній магістерській роботі заходи з охорони праці розглядатимуться для типового оперативно-диспетчерського пункту промислової електричної мережі.

На кожному диспетчерському пункті, щиті керування електрогосподарством споживача з постійним чергуванням працівників повинні міститися інструкції (положення) щодо оперативних взаємовідносин з електропередавальною організацією з включенням власних електростанцій, а також інструкції із запобігання та ліквідації аварій та інших порушень, які складаються згідно з типовими інструкціями органу вищого рівня оперативно-диспетчерського керування.

На диспетчера оперативно-диспетчерського пункту за [24] впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря у робочій зоні;
- підвищена швидкість руху повітря;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;

б) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (статичні)
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Безпека щодо організації робочих місць

Розглянемо умови праці диспетчера в типовому оперативно-диспетчерському пункті. Підлога у приміщенні цементобетонна, покрита лінолеумом, поверхня стін рівна, без вибоїн і зручна для очищення і вологого прибирання. На стінах наклеєні шпалери нейтрального кольору, який не стомлює зір операторів ЕОМ. Стеля покрита білою фарбою. У приміщенні є входні двері й два вікна. План приміщення оперативно-диспетчерського пункту показано на рисунку 5.1. У приміщенні диспетчерського пункту в кожній розетці є фаза нуль, а будівля заземлена по контуру. Освітлення бічне природне – 2 вікна і штучне – лампи розжарювання у кількості 12 штук (80 Вт). У приміщенні розташовується радіатор опалення, закритий дерев'яними ґратами. Температура повітря в холодну пору року від $+20^{\circ}\text{C}$ до $+25^{\circ}\text{C}$, а в теплий сезон від $+25^{\circ}\text{C}$ до $+32^{\circ}\text{C}$, що не відповідає нормам. У приміщенні знаходяться шафа, мнемосхема, пульт управління мнемосхемою, робочі столи і стільці. На робочих місцях диспетчерів розташовуються монітор, клавіатура, миша, принтер, телефон, лоток для паперів і підставка для ручок, системний блок знаходиться на підлозі. У диспетчерів п'ятиденний робочий тиждень з восьмигодинним робочим днем і годинною перервою на обід.

5.1.2 Електробезпека

Згідно із [27] в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того, безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

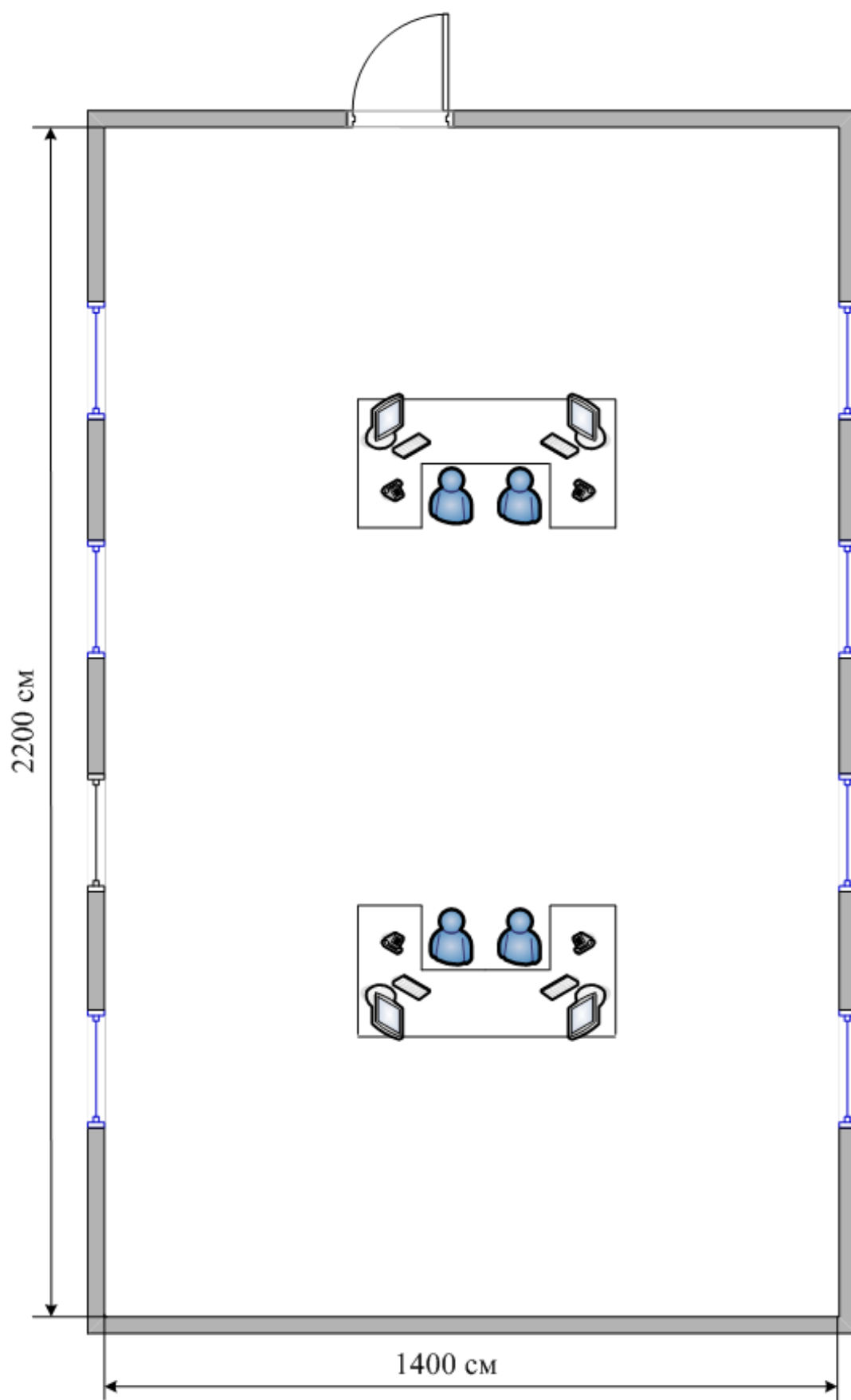


Рисунок 5.1 - План приміщення оперативно-диспетчерського пункту

В установках напругою до 1 кВ огородження роблять суцільними. Безпечні відстані між огородженнями і неізовованими струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огородженнями - 5см. Висота розміщення не огороджених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустаткуванням. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробою і створити небезпеку при дотику людини до ізовованих проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

Обов'язкова установка захисного заземлення і занулення та захисного відключення. При роботі з електроустаткуванням існують основні і додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізововуючі штанги; ізововуючі і струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізововуючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огороджуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

На ключах керування і приводах роз'єднувачів віддільників і вимикачах навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, вивішують плакат: "Не включати - працюють люди". На вентилях, що закривають доступ повітря в пневматичні приводи таких апаратів, вивішується плакат: "Не відкривати - працюють люди".

Передбачена магістерською роботою апаратура повинна експлуатуватися у відповідності з паспортними значеннями номінального струму та напруги. В процесі експлуатації слід постійно контролювати стан контактних сполучень та ізоляції апаратури, відсутність слідів дуги та оплавлення, опір ізоляції силових та освітлювальних мереж, правильність підключення. На всіх підготовлених місцях для роботи після накладання заземлення вивішується плакат "Працювати тут".

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату є [29] .

Мікроклімат оперативно-диспетчерського пункту характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання.

Робота диспетчера оперативно-диспетчерського пункту відноситься до категорії Іб по важкості праці.

Енерговитрати за цією категорією становлять - до 140-174Вт.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1- Допустимі норми параметрів повітря

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

Відповідно до [29] для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату необхідно обладнати приміщення сучасними системами вентиляції й кондиціонування повітря, здійснювати природне провітрювання приміщення.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично-допустимими концентраціями в мг/м³ .

Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони – це концентрації, які при щоденній (крім вихідних днів) роботі протягом 8 годин чи іншої тривалості, але не більше 41 години на тиждень, протягом усього робочого стажу не можуть викликати захворювань або відхилень у стані здоров'я.

При роботі комп'ютерної техніки виділяється пил нетоксичний. Чистота повітряного середовища досягається видаленням забрудненого, нагрітого або іонізованого повітря з робочого приміщення з подачею свіжого повітря. ГДК відповідно до [26] наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні диспетчера

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності	Особливості дії на організм
	Максимально разова	Середньо добова		
Пил	0,5	0,15	IV	А,Ф

Примітки: А – речовини, які можуть викликати алергічні захворювання в виробничих умовах;

Ф – аерозолі переважно фіброгенної дії.

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до [26] роботою передбачені наступні рішення :

- застосування загальнообмінної приточно-витяжної вентиляції, за допомогою вентиляції зменшується та ліквідується запиленість і загазованість повітря; забезпечується збереження будівельних конструкцій та устаткування.

- застосовування механічної припливно-витяжної системи вентиляції і природної вентиляції: організованої і неорганізованої. При неорганізованій природній вентиляції приплив і видалення повітря здійснюється через нещільності і пори зовнішніх огорожень (інфільтрації), через вікна, кватирки. При організованій природній вентиляції застосовують аерацію і вентиляцію за допомогою дефлекторів.

- необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні.

Контроль ГДК шкідливих речовин у приміщенні оперативно-диспетчерського пункту проводиться на робочих місцях. При можливості виділення у робочу зону шкідливих речовин із гостронаправленим механізмом дії повинен бути забезпечений безперервний контроль із сигналізацією про перевищення ГДК.

5.2.3 Освітлення

Природне освітлення:

Оперативно – диспетчерський пункт знаходиться у Вінницькій області, система природного освітлення приміщення відноситься до бокової. За нормативними вимогами [34] в приміщенні оперативно – диспетчерського пункту використовується суміщене освітлення.

Характеристика зорової роботи – високої точності. Відповідно до [31] розряд зорової роботи III. При боковому освітленні КПО для природнього освітлення (e_i) = 2%, для суміщеного (e_i) = 1,2%,.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості. Нормоване значення КПО для даного приміщення розраховуємо за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (5.1)$$

де e_n - значення КПО для будівлі;

m_n - коефіцієнт світлового клімату, $m_n = 0,9$.

Нормоване значення КПО для природнього освітлення:

$$e_n = 2 \cdot 0,9 = 1,8\%.$$

Нормоване значення КПО для суміщеного освітлення:

$$e_n = 1,2 \cdot 0,9 = 1,1\%.$$

Природне освітлення одностороннє і здійснюється через вікна, які орієнтовані на схід.

Штучне освітлення:

Правильна експлуатація установок природного і штучного освітлення відіграє важливу роль для створення високого рівня освітленості в приміщеннях і економії

електроенергії, що витрачається на штучне електричне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні занесені до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 - Норми освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк	
						Штучне освітлення	
						Комбіноване	Загальне
Високої точності	Вище 0,3 до 0,5	III	г	Середній Великий	Світлий Середній	400	200

Додаткове штучне освітлення створює хорошу видимість інформації на екрані монітора комп'ютера, тексту на папері та інших матеріалів для роботи. При цьому в полі зору працюючих забезпечуються оптимальні яскравості оточуючих поверхонь, виключена або гранично обмежена відображена бляклість від екрану в результаті відбиття світлового потоку від джерел світла і світильників. При периметральном розташуванні комп'ютерів світильники розташовуються локалізовано над робочим місцем ближче до переднього краю, зверненого до користувача. У якості джерела штучного освітлення використовуються люмінесцентні лампи денного світла потужністю 65-80 Вт, коефіцієнт пульсації не повинен перевищувати 5%. Існують спеціальні люмінесцентні лампи, що імітують повний спектр природного сонячного світла. Не можна застосовувати світильники без розсіювачів та екрануючих ґрат.

При експлуатації електричних пристроїв включається регулярне очищення віконних проїм будівель від забруднень, своєчасна заміна перегорілих ламп і контроль за рівнем напруги в освітлювальній мережі, підвищення загального рівня культури експлуатації будівель, що забезпечують чистоту повітря у приміщенні і відсутність викиду в атмосферу пилу, кіптяви і так далі, а також регулярне фарбування та побілка стін і стелі.

5.2.4 Виробничий шум

Основними джерелами шуму в оперативно-диспетчерських пунктах, оснащених комп'ютерною технікою є принтери і кондиціонери, а в самих комп'ютерах - вентилятори охолодження і трансформатори блоку живлення.

Шум - це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину.

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки - дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має кумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

вищий серед осіб, що працюють у гомінких умовах, ніж у людей, що працюють у нормальних звукових умовах.

Рівень звуку вимірюється в децибелах і визначається за формулою:

$$L = 10\lg(I/I_0) = 10\lg(p/p_0) = 10\lg(U/U_0) \quad (5.2)$$

де L - рівень шуму, дБ;

p - звуковий тиск, Па;

U_0 - коливальна швидкість, 5-10 м/с;

P_0 - нульове значення звукового тиску, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^5$ Па.

При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

-нормування за гранично допустимим спектром шуму;

-нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум - широкопasmовий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням - гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами [35] і наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Праця з часто отримуваними вказівками та акустичними сигналами, робочі місця в приміщеннях диспетчерської служби, з мовним зв'язком, машинописне бюро	96	83	74	68	63	60	57	55	54

Заходи захисту від шуму полягають у використанні малOSHумного обладнання та застосуванні звукопоглинальних пристроїв. У даних умовах шум, як правило, не перевищує допустимих меж, оскільки в комп'ютерній техніці немає обертових вузлів і механізмів.

5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають будь-які механічні коливання пружинних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Коливання тіл з частотою, нижчою 16 Гц сприймається організмом, як вібрація, а коливання з частотою 16... 20 Гц і більше - одночасно як вібрація і як звук. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці).

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10^{-2} , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

Таблиця 5.5 - Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	2250	5500	11000
Загальна вібрація: в приміщеннях для робітників розумової праці (КБ, лабораторії та інш.)	$\frac{0,18}{91}$	$\frac{0,063}{82}$	$\frac{0,032}{76}$	$\frac{0,028}{75}$	$\frac{0,028}{75}$	$\frac{0,028}{75}$	-	-	-	-

Існують наступні методи боротьби з вібрацією:

- віброізоляційний захист (зменшення передачі вібрації від джерела збудження за допомогою віброізоляторів);
- віброгасіння (зменшення рівня вібрації від джерела збудження за допомогою введення в систему додаткових реактивних опорів);
- вібропоглинання (застосовується для зменшення вібрації кожухів, коливання яких виникає в резонансовому режимі).

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи компенсуючих установок в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Компенсація реактивної потужності - важлива та необхідна умова економічного та надійного функціонування системи електропостачання підприємства. Вона необхідна, коли реактивна потужність і енергія погіршують показники роботи енергосистеми, тобто завантаження реактивними струмами генераторів електростанцій збільшує витрату палива, збільшуються втрати в мережах і приймачах, збільшується спад напруги в мережах.

Реактивний струм додатково навантажує лінії електропередачі, що призводить до збільшення перерізів проводів і кабелів і, відповідно, до збільшення капітальних витрат на зовнішні і внутрішні мережі. Реактивна потужність разом з активною потужністю враховується постачальником електроенергії, а отже, враховується в оплату за електроенергію.

Щоб не порушувати баланс потужностей енергосистеми, не завдавати фінансових збитків та контролювати якість електроенергії в допустимих межах, необхідно забезпечити безпеку роботи КУ.

Значних збитків для компенсуючих установок можуть нанести НС техногенного характеру. На жаль, більшість українських підприємств застарілі і їх стан із року в рік погіршується, що призводить до аварійних ситуацій. Як правило, аварії на підприємствах пов'язані із пожежами, вибухами, внаслідок чого руйнуються або пошкоджуються технологічне устаткування, виробничі та житлові будівлі, машини.

Найбільшу загрозу для компенсуючих установок представляють аварії, які пов'язані з дією радіації та електромагнітного імпульсу. Дія радіації на матеріали залежить від виду випромінювання, дози, природи опроміненої речовини та від умов навколишнього середовища. В енергетичних системах використовують різні матеріали: метали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли), найбільш чутливими до радіації є метали, бо в них велика концентрація вільних носіїв. При великих дозах дії іонізуючого та електромагнітного випромінювання втрачає працездатність радіоелектроніка та електроавтоматика. Електромагнітне випромінювання пробиває ізоляцію, випалює елементи електросхем апаратури, викликає коротке замикання.

Найбільш часто виходять з ладу напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори. В резисторах електромагнітний імпульс викликає іскріння в міжконтактних з'єднаннях, що приводить до локального нагріву і порушує опір покриття. В конденсаторах електромагнітний імпульс викликає нагрів шару металізації і його вигорання, порушення контактів між обкладками і выводами. Усі ці наслідки в подальшому призводять до пожеж на підприємстві, а в подальшому розвитку можливі і вибухи. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання.

5.3.1 Дослідження безпеки роботи компенсуючих установок в умовах дії іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання - це випромінювання, взаємодія якого з середовищем призводить до утворення електричних зарядів (іонів) різних знаків. Джерелом іонізуючого випромінювання є природні та штучні радіоактивні речовини та елементи (уран, радій, цезій, стронцій та ін.).

Іонізуюче випромінювання характеризується двома основними властивостями: здатністю проникати через середовище, що опромінюється, та іонізувати повітря і живі клітини організму. Причому обидві ці властивості зв'язані між собою обернено пропорційною залежністю.

При великих дозах випромінювання втрачають працездатність компенсуючі установки. Під дією іонізуючих випромінювань можлива зміна майже всіх електричних і експлуатаційних характеристик КУ, що залежать від протікання процесів іонізації і порушення структури матеріалів.

Визначаємо граничне значення рівня радіації гамма-випромінювання, при якому КУ буде працювати, враховуючи максимально-допустиму дозу випромінювання для конденсаторів $P_{зв}=10^6$ Р/с:

$$P_{гр} = K \cdot P_{зв} \cdot K_{посл} \text{ [Р/ с] ;} \quad (5.3)$$

де $P_{зв}$ – рівень радіації, що відповідає початку зворотних змін в конденсаторах;

K – коефіцієнт надійності ($K=0,9-0,95$);

$K_{посл}$ – коефіцієнт послаблення виробничого приміщення ($K_{посл}=4$).

$$P_{гр} = 0,9 \cdot 10^6 \cdot 4 = 3,6 \cdot 10^6 \text{ (Р/ с) .}$$

Отже, компенсуючі установки будуть безпечно працювати при рівні радіації, який не перевищує 3600000 Р/с.

5.3.2 Дослідження безпеки роботи компенсуючих установок в умовах дії електромагнітного імпульсу

ЕМІ мають горизонтальну та вертикальну складові напруженості електричного поля і тому повинні визначатися значення напруги на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній. Для оцінки безпеки елементів системи електропостачання в умовах дії електромагнітних випромінювань необхідно визначити значення горизонтальної складової напруженості електричного поля при коефіцієнті безпеки, рівному $K_6 = 40$ дБ.

Критерієм оцінки безпеки є коефіцієнт K_6 , дБ:

$$K_6 = 20 \cdot \lg \frac{U_D}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{ [дБ]}; \quad (5.4)$$

де U_D – допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{B(\Gamma)}$ – напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань в вертикальних (горизонтальних) струмовідних частинах, В.

Визначимо допустимі коливання напруги живлення, В

$$U_D = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N; \quad (5.5)$$

де N - коливання напруги, $N=5\%$;

$U_{\text{ж}}=12$ В – напруга живлення.

$$U_D = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6 \text{ (В)}.$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля:

$$E_B = 10^{-3} \cdot E_{\text{Вмакс}} = 10^{-3} \cdot 10200 = 10,2 \text{ (В/м)}.$$

Визначаємо горизонтальну наведену напругу на струмоведучих частинах та коефіцієнт безпеки:

Максимальна довжина горизонтальних струмоведучих частин $l_\Gamma = 1,1$ м.

$$U_\Gamma = E_B \cdot l_\Gamma = 10,2 \cdot 1,1 = 11,22 \text{ (кВ)};$$

$$K_{6\Gamma} = 20 \cdot \lg \left(\frac{12,6}{11,22} \right) = 1,008 \text{ (дБ)}.$$

Таким чином, для безпечної роботи КУ в умовах дії електромагнітного імпульсу необхідно, щоб вертикальна складова напруженості електричного поля не перевищувала значення $E_v = 10,2$ (В/м).

5.4 Розробка превентивних заходів по підвищенню безпеки роботи компенсуючих установок в надзвичайних ситуаціях

Компенсація реактивної потужності є однією з найбільш ефективних енергозберігаючих технологій в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній. Засоби управління компенсуючими установками забезпечують:

- мінімум втрат потужності й електроенергії в електричних мережах;
- виконання обмежень енергосистеми на споживання реактивної потужності з її мережі в періоди максимуму і мінімуму її активних навантажень за найменших втрат електроенергії в мережах підприємства;
- зниження споживання реактивної потужності в періоди позапікового споживання енергосистеми до нуля (з максимально можливим використанням діючих компенсуючих установок для зниження втрат електроенергії);
- високу надійність в роботі, зручність в експлуатації і безпеку в обслуговуванні.

Саме тому необхідно, щоб КУ функціонували надійно та безпечно, а також були стійки до дії електромагнітного імпульсу та випромінювання.

Для того, щоб компенсуючі установки були стійкими в умовах дії електромагнітного імпульсу, необхідно щоб коефіцієнт безпеки знаходився в межах від 0 до 40 (дБ). Так як $K_{б(в,г)} < 40$ (дБ), то КУ буде нестійка в роботі, тому необхідне екранування. Розрахуємо перехідне затухання енергії електричного поля екраном та товщини стінок екрану для блоку живлення.

$$A_{\text{екр}} = K_{\text{бном}} - K_{\text{бг}} = 40 - 1,008 = 38,992 \text{ (дБ)};$$

$$t = \frac{A_{\text{екр1}}}{k \cdot \sqrt{f}} = \frac{38,992}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,06 \text{ (см)};$$

Засоби захисту від електромагнітного імпульсу: екранування джерела випромінювання, виділення зони випромінювання (зонування території), встановлення раціональних режимів експлуатації обладнання, застосування сигналізації, захист відстанню, захист часом, засоби індивідуального захисту.

Засоби захисту від радіації: завчасне накопичення і підтримання у готовності засобів індивідуального захисту, приладів дозиметричного і хімічного контролю, екранування та загородження робочих місць щитами, ширмами.

Основними способами підвищення безпеки є: розміщення елементів в захисних корпусах, зміна легкогорючих елементів на вогнетривкі, захист елементів легкими вогнетривкими екранами, також необхідне проведення профілактичних ремонтних робіт по підвищенню функціонування КУ, дотримання техніки безпеки.

Висновки: в даному розділі розглянуті питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Заходи з охорони праці розглядалися для типового оперативно-диспетчерського пункту розподільної електричної мережі. Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ГОСТу передбачено застосування загальнообмінної приточно-витяжної вентиляції, механічної припливно-витяжної системи вентиляції і природної вентиляції як організованої, так і неорганізованої, а також запропоновано здійснювати регулярний контроль за гранично допустимими концентраціями шкідливих речовин у приміщенні.

Також в даному розділі було визначено, що компенсуючі установки будуть надійно працювати в нормальному режимі в умовах дії електромагнітного імпульсу, якщо вертикальна складова напруженості електричного поля не буде перевищувати його граничне значення $E_b = 10,2$ (В/м). Для підвищення безпеки роботи КУ до ЕМІ необхідно встановити захисний екран із сталі з товщиною стінок не менше 0,6 (мм). КУ в умовах дії іонізуючих випромінювань буде безпечно працювати при рівні радіації, який не перевищує 3600000 Р/с.

Доцільним буде підвищення безпеки КУ шляхом проведення профілактичних ремонтних робіт по підвищенню функціонування КУ, дотримання правил техніки безпеки.

ВИСНОВКИ

В першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи було здійснено загальний аналіз електричних мереж промислових підприємств. Описано структуру, функції, особливості та проблеми ЕМПП. Електричні мережі промислових підприємств відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності виробничих процесів, їх надійності та економічності. Вони характеризуються високою енергоємністю, складною структурою, необхідністю компенсації реактивної потужності та підвищеними вимогами до якості електроенергії. Описано ефект від використання пристроїв КРП в ЕМПП. Проведено аналіз найбільш розповсюджених пристроїв КРП в ЕМПП. Встановлено, що вибір конкретного типу пристрою компенсації залежить від параметрів місця встановлення, типу та динаміки навантаження, вимог до надійності та швидкості компенсації, а також економічних аспектів. Розраховано та обрано релейний захист для БСК типу УКР 0,4-200/50.

В другому розділі проведений загальний аналіз методів керування пристроями КРП. Досліджено два підходи до розробки методів керування пристроїв КРП. Перший спосіб орієнтований на параметри електричної мережі (напруга, струм, час тощо) і забезпечує безпосереднє керування компенсацією відповідно до стану мережі. Другий спосіб орієнтується на типи контролю і способи організації управління, що задіє різні рівні автоматизації, централізації і залежності від оператора. Наведено математичні моделі керування пристроями БСК, та здійснено опис випадків їх використання.

Проаналізовано методи керування пристроями СТК. Досліджено систему керування СТК від компанії АВВ.

Були розглянуті методи забезпечення заданої вхідної реактивної потужності при мінімумі втрат активної потужності. Встановлено, що послідовність вмикання секцій КУ в усіх вузлах з метою забезпечення заданої вхідної реактивної потужності 1500 квар для підприємства, визначена за допомогою різних моделей керування потужностями конденсаторних установок, є однаковою. Це зумовлено тим, що всі моделі мають спільну складову зниження втрат, яка найбільше впливає на

управління секціями КУ. Отже, можна керувати реактивними потоками всієї схеми, використовуючи лише дані про її частину. Це дасть змогу знизити затрати на створення системи управління компенсуючими установками.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП. Запропонований метод КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання РП.

2. Розроблено математичну модель електричної мережі з СТК для КРП, яка дає змогу дослідити ефективність обраного методу роботи системи керування пристроєм СТК.

3. Досліджено різні режими роботи СТК на отриманій моделі з метою налаштування цифрової системи управління при різних змінних графіках навантажень споживачів електричної енергії.

4. В цілому було показано, що розробка та впровадження передових методів керування пристроями КРП є важливим завданням для електричних мереж промислових підприємств. Сучасні методи автоматизації та моделювання, можуть істотно підвищити ефективність роботи мереж і покращити якість електроенергії, що постачається. Шляхом рішення оптимізаційних задач за допомогою математичних моделей, які здатні відтворювати основні властивості реальних електричних мереж.

Проведено аналіз стартап проекту, було продемонстровано технічну сторону питання та доцільність проекту, аналіз ринкових можливостей показав, представлена методика орієнтована на широку аудиторію ринку енергетики і є вигідною для всіх груп споживачів.

В п'ятому розділі виконано аналіз фізичних та психофізіологічних факторів, що впливають на електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який буде здійснювати експлуатацію силового обладнання, описано технічні рішення з безпечної експлуатації, та рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 236 с.
2. Демов О. Д. Оптимізація процесу впровадження компенсувальних установок у розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016. 97 с.
3. Бурбело, М. Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання : навчальний посібник / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 123 с.
4. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017, 617 с.
5. Бурбело М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ, 2023. 159 с.
6. Handbook of Power Quality. Edited by Angelo Baggi. 2008. John Wiley & Sons, Ltd. 642 p.
7. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І.В. Жежеленко, Г.Г. Півняк, Г.Г. Трофімов, Ю.А. Папайка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. Ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 72 с.
8. Удосконалення пристроїв компенсації реактивної потужності та методів управління ними: автор. дис. . кандидата технічних наук: 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" (технічні науки) / О.С. Савенко ; Національний університет біоресурсів і природокористування. - Київ, 2021. - 217 с.
9. Бурбело М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ, 2024. 159 с.
10. Демов О.Д. Економія електроенергії на промислових підприємствах : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2006. 95 с.

11. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго. [Чинний від 03.02.2021]. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2021. 316 с. (Інформація та документація).

12. J. W. Dixon, Y. del Valle, M. 25 Orchard, M. Ortuzar, L.Moran and C Maffrand, "A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, № 5, October 2003, pp. 982-989.

13. Бурбело, М. Й. Спеціальні питання електропостачання: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 89 с.

14. Оптимізація впровадження та використання компенсувальних установок у розподільних електричних мережах енергопостачальних споживачів: монографія / О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 80 с.

15. М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Л. М. Мельничук «Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах: монографія» Вінниця : ВНТУ, 88 с. 2019.

16. Терешкевич, Л. Б. Оптимізація режимів електроспоживання : навчальний посібник / Л. Б. Терешкевич. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 112 с.

17. Пат. 106174. Україна. МПК G05F 1/70 (2006.01). Спосіб компенсації реактивної потужності / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенна (Україна). – Заявлено 09.09.13. № а22013 10824; Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 3.

18. Пат. 94181. Україна. МПК H 02 J 3/00. Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження / М. Й. Бурбело, М. В. Никитенко (Україна). – Заявлено 19.02.10. № а201001785; Опубл. 11.04.2011. Бюл. № 7.

19. Simulink – моделювання і симуляція динамічних систем: веб-сайт. URL: <http://matlabproducts/simulink> (дата звернення: 06.05.2023)

20. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.

21. Методи оцінки ефективності інвестиційних проектів: веб-сайт. URL: <https://buklib.net/books/37224/> (дата звернення: 18.10.2024)
22. Період окупності проекту (Payback Period - PBP): веб-сайт. URL: <https://studentbooks.com.ua/content/view/1308/42/1/3/> (дата звернення: 18.10.2024)
23. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки відносно опрацювання розділу "Охорона праці" в дипломних проектах и роботах студентів електротехнічних спеціальностей: навч. Посіб. Вінниця, ВНТУ, 2003. 46 с.
24. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
25. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
26. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_a322_2009/1-1-0-945.
27. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
28. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
29. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
30. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
31. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL:

http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

32. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

34. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

35. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

36. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

37. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

38. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

39. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

40. Гуменний Владислав. Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної потужності. Матеріали Науково-технічної конференції Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023) [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/>

ДОДАТКИ

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Вінниця 2024 р.

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за № 310 від 17.09.24р.

Дата початку роботи 14.10.24р.

Дата закінчення роботи 07.12.24р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

а) мета – дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) вихідні дані для виконання МКР:

відомості про електричні навантаження споживачів, відомості про джерела живлення та реактивної потужності, відомості та перспективу розвитку; основні техніко-економічні показники.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

3.1 Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017, 617 с.

3.2. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Л.Б. Терешкевич, О.Д. Демов, Ю.А. Шулле. – Вінниця: ВНТУ, 2006.

3.3 Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки відносно опрацювання розділу "Охорона праці" в дипломних проектах и роботах студентів електротехнічних спеціальностей: навч. Посіб. Вінниця, ВНТУ, 2003. 46 с.

3.4 Демов О. Д. «Економія електроенергії на промислових підприємствах». – Вінниця: ВНТУ, 2006р.

4. ЕТАПИ І ТЕРМІН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Зміст етапу	Термін виконання	
	початок	кінець
4.1 Збір інформації, яка необхідна для дослідження	14.10	20.10
4.2 Проведення дослідних розрахунків	20.10	20.11
4.3 Розробка робочих креслень	20.11	22.11
4.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи	22.11	10.12

5. МАТЕРІАЛИ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні і ілюстровані матеріали, анотація до МКР українською та іноземною мовою.

6. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ МКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисті та захисті в ДЕК.

7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

7.1 Дані про патентоспроможність

Не передбачається

8 ОЧІКУВАНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Не передбачається

Додаток Б

(обов'язковий)

ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ

Таблиця Б.1 – Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно параметрів електричної мережі

Метод керування	Опис	Переваги	Недоліки
За часом роботи навантаження	Регулювання роботи КРП відповідно до пікових і непікових періодів навантаження.	Оптимізація роботи за графіком, зниження енергоспоживання в непікові години.	Недостатня адаптивність до раптових змін у навантаженні, потреба в точному прогнозуванні.
За струмом	КРП активується при досягненні певного рівня струму, що свідчить про підвищене навантаження на мережу.	Швидка реакція на коливання навантаження, ефективна компенсація в реальному часі.	Може спрацювати на тимчасові коливання струму, що може призвести до зайвих включень.
За напругою вузла під'єднання	КРП активується або змінює режим роботи при досягненні певного рівня напруги у точці підключення.	Підтримання стабільної напруги у вузлі під'єднання, запобігання перенапрузі або зниженню напруги.	Може викликати часті включення і виключення при нестабільній напрузі, особливо в малих мережах.
За споживаною реактивною потужністю (РП)	Керування КРП на основі аналізу рівня споживання реактивної потужності навантаження в режимі реального часу.	Точна компенсація відповідно до фактичного навантаження, зменшення втрат на передачу енергії.	Потребує високої точності вимірювання РП, може мати затримку в реакції на швидкі зміни навантаження.
За коефіцієнтом потужності (cosφ)	Активується при зниженні коефіцієнта потужності нижче заданого рівня, забезпечуючи його підтримання.	Підтримка оптимального коефіцієнта потужності, що покращує енергоефективність мережі.	Залежність від точності вимірювання cosφ, можливі зайві спрацювання при швидких коливаннях.

Таблиця Б.2 – Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно організації процесу керування і способах контролю за роботою КРП

Метод керування	Опис	Переваги	Недоліки
Автоматичне керування	КРП автоматично вмикається та вимикається на основі параметрів мережі (напруги, струму або коефіцієнта потужності). Це дозволяє підтримувати стабільну роботу мережі.	- Швидка реакція на зміни в мережі. - Мінімізація втручання оператора. - Підвищення стабільності роботи мережі.	- Висока вартість обладнання. - Складність налаштування і обслуговування.
Централізоване керування	Керування КРП здійснюється з одного центрального пункту, що дозволяє контролювати та регулювати роботу всіх пристроїв в мережі з одного місця.	- Узгоджене керування всіма пристроями в мережі. - Легкість у відстеженні стану КРП.	- Висока залежність від центрального пункту. - Потреба в надійній системі комунікацій.
Ручне керування	Оператор вручну вмикає та вимикає КРП на основі поточної ситуації в мережі та власного досвіду.	- Простота реалізації та низька вартість. - Гнучкість у разі нестандартних ситуацій.	- Велика залежність від кваліфікації оператора. - Можливі затримки в реакції на зміни в мережі.
Програмовані логічні контролери (PLC)	Використання PLC для автоматизації керування КРП, яке дозволяє програмувати необхідні параметри та сценарії для керування.	- Висока гнучкість програмування. - Надійна та автоматизована робота. - Можливість адаптації під специфічні умови мережі.	- Висока вартість впровадження. - Потребує кваліфікованого обслуговування.
Керування на основі графіків навантаження	КРП вмикається відповідно до заздалегідь складеного графіка навантаження, що дозволяє зменшити витрати на енергію в непікові періоди.	- Оптимізація використання ресурсів. - Зниження витрат в непікові години. - Зменшення зносу обладнання завдяки керуванню за графіком.	- Недостатня гнучкість при раптових змінах у навантаженні. - Потреба у точному прогнозуванні графіків, щоб уникнути недостатньої компенсації або перевантаження.

Таблиця Б.2 – Порівняльна таблиця методів забезпечення вхідної РП

Метод 1 - Забезпечення в.р.п. по мінімуму втрат мереж окремого дерева		$Q_i^2 R_i \rightarrow \min$			
Х-ки	Вузли	1	2	3	4
	К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200
Втрати активної потужності до встановлення КУ ΔP , кВт		7,45	14,77	6,429	4,032
Втрати активної потужності після встановлення КУ ΔP , кВт		1,862	1,278	2,315	1,792
Метод 2 - Забезпечення в.р.п. по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж		$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$			
К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути		400	600	300	200
Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт		1,746	3,27	1,6	1,232
Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт		0,815	0,82	0,914	0,784
Метод 3 - Забезпечення в.р.п. по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з живлячою лінією		$\frac{2Q_{ci} R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$			
К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути		400	600	300	200
Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт		4	5,526	3,854	3,4858
Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт		1,923	2,231	2,098	2,045

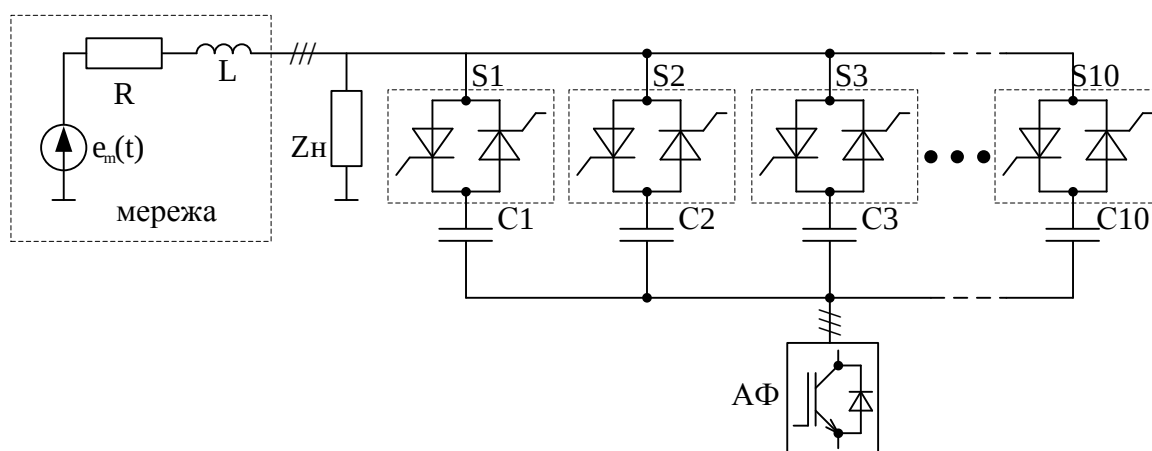


Рисунок Б.1 – Пристрій для КРП з плавним (безперервним) регулюванням реактивної потужності

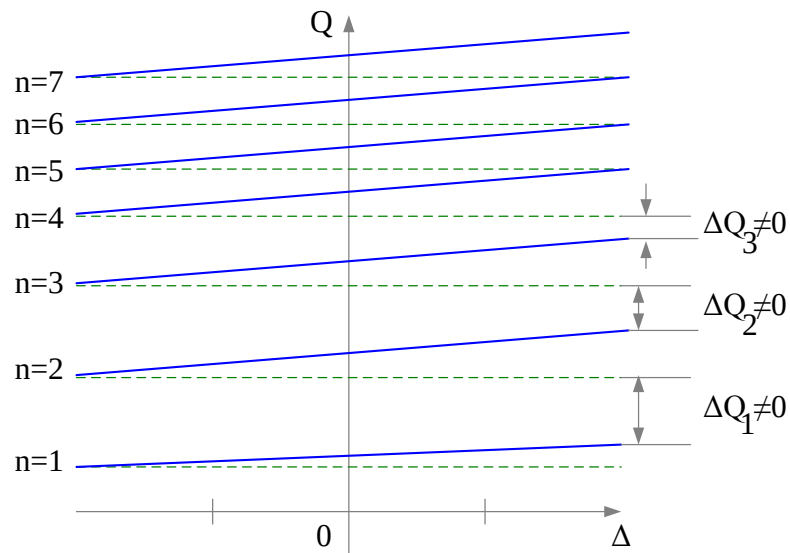


Рисунок Б.2 – Регулювальна характеристика КРП

Таблиця Б.4 –Десять ступенів безперервного регулювання потужності КРП

Конденсатор	C1	2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Ємність, мкФ	Включені конденсатори +									
Номер ступеня БК										
1	+									
2	+	+								
3	+	+	+							
4	+	+	+	+						
5	+	+	+	+	+					
6	+	+	+	+	+	+				
7	+	+	+	+	+	+	+			
8	+	+	+	+	+	+	+	+		
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

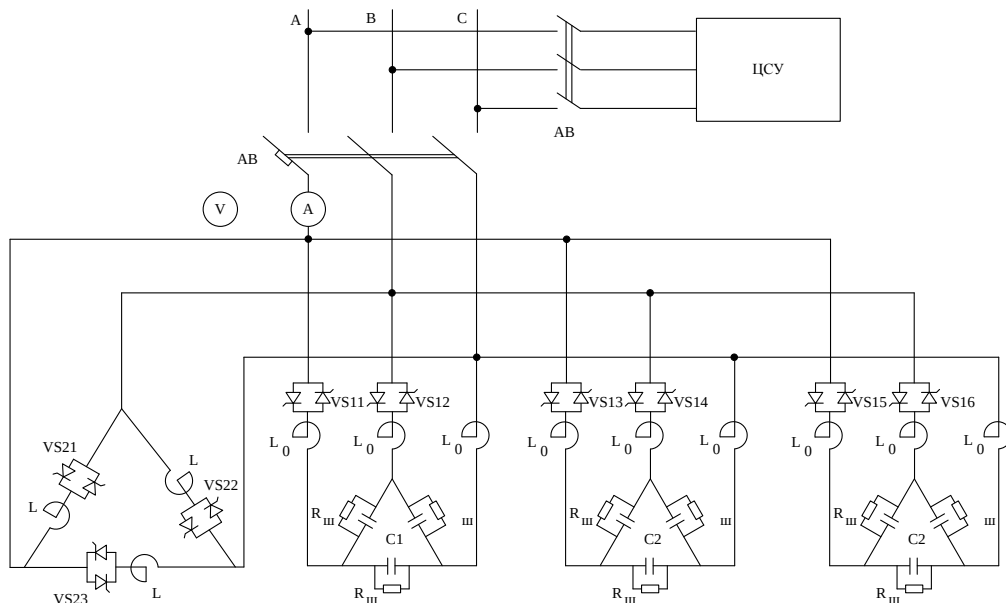


Рисунок Б.3 – Принципова схема СТК

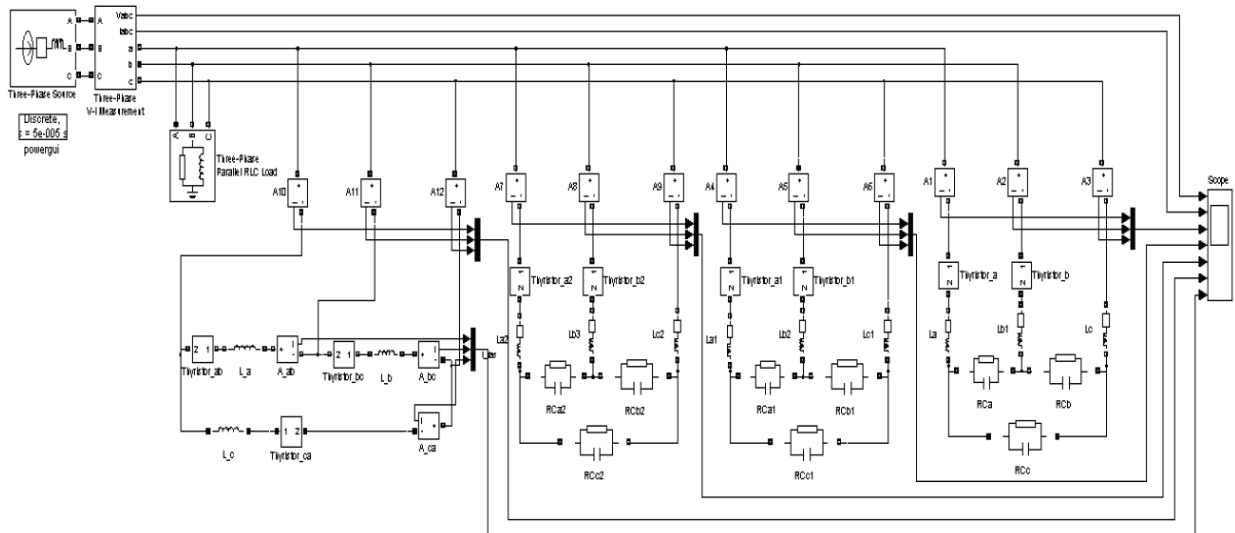


Рисунок Б.4 – Модель СТК

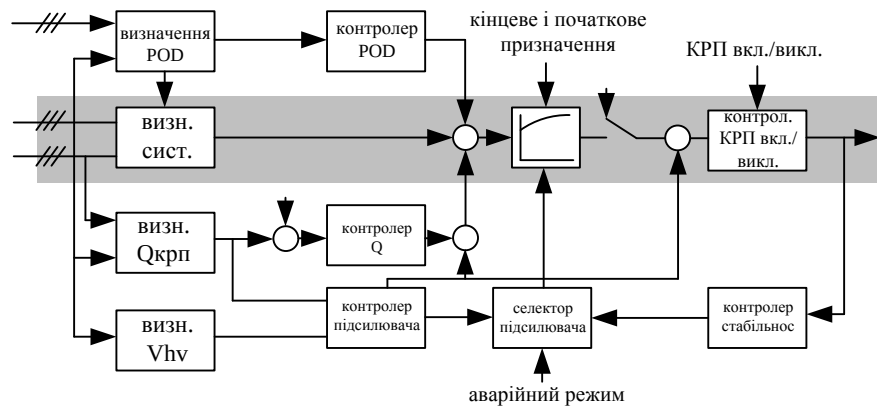


Рисунок Б.5 – Система керування компенсатором

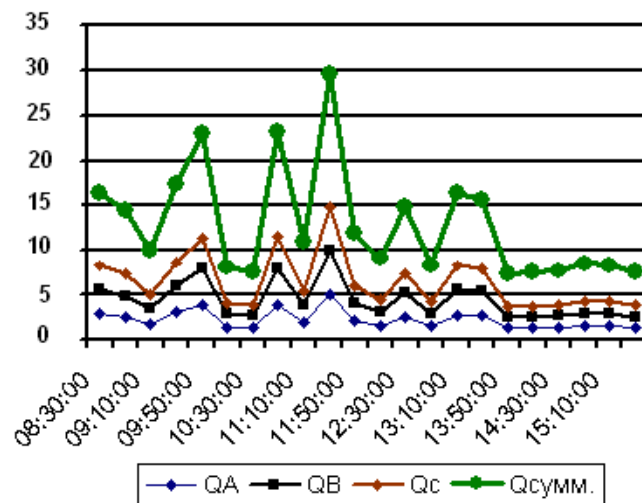


Рисунок Б.6 – Графік вузла навантаження до КРП за допомогою СТК

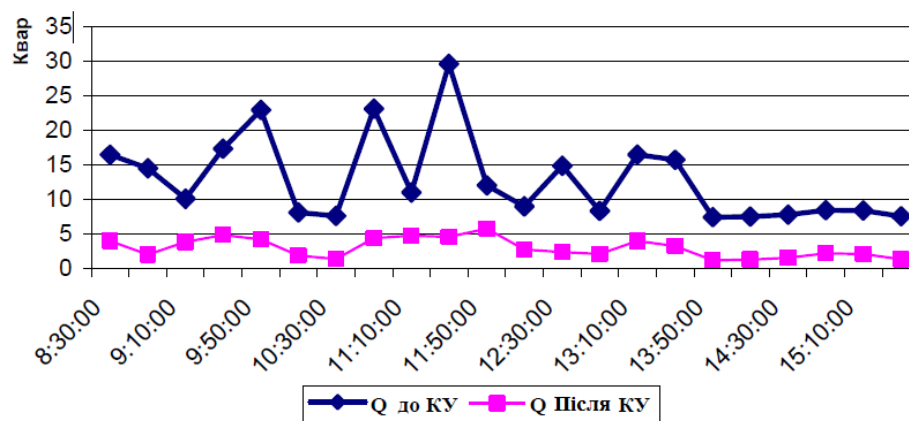


Рисунок Б.7 – Графік вузла навантаження до і після установки СТК

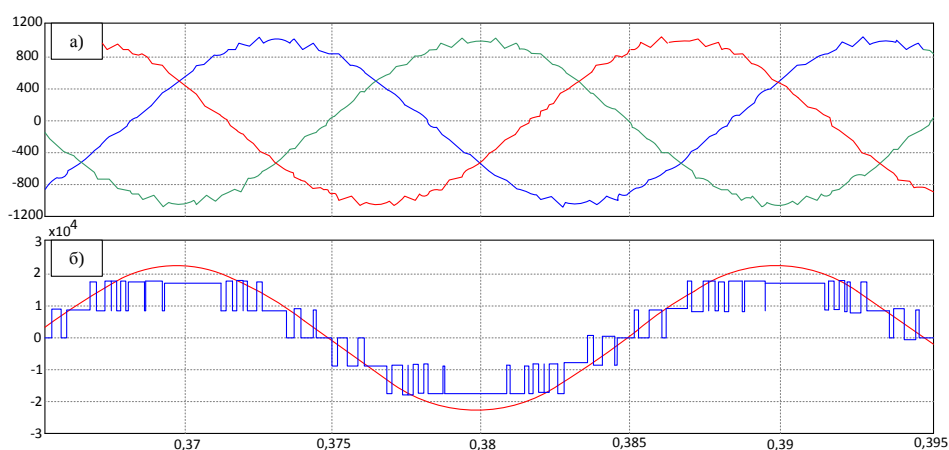


Рисунок Б.8 – Режим споживання номінальної реактивної потужності а) фазні струми; б) лінійна напруга перетворювача (синім) і лінійну напругу мережі (червоним)

Додаток В
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ

Додаток В

ПРОТОКОЛ

ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної
потужності в електричних мережах промислових підприємств

Тип роботи: _____ МКР _____
(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	84%	Схожість	16%
----------------	-----	----------	-----

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☐ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____ Лобода Ю.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Turnitin щодо роботи.

Автор роботи _____ Гуменний В.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Бурбело М.Й.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Додаток Г
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

Дослідження методів керування пристроями компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕСЕ-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

Гуменний Владислав Олегович

Науковий керівник:
Бурбело Михайло Йосипович ,
доктор технічних наук, професор

Мета та задачі магістерської кваліфікаційної роботи

2

Мета і задачі дослідження. Метою даної магістерської роботи є дослідження методів керування пристроями КРП в електричних мережах промислових підприємств для досягнення оптимальної роботи даних пристроїв.

Наукова новизна:

1. Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП. Запропонований метод КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання РП.

2. Розроблено математичну модель електричної мережі з СТК для КРП, яка дає змогу дослідити ефективність обраного методу роботи системи керування пристроєм СТК. Здійснено моделювання основних режимів роботи пристрою СТК в електричній мережі для досягнення оптимальної КРП.

Практична цінність. Розроблена математична модель електричної мережі з СТК на базі цифрової системи керування пристроєм КРП може бути використана організаціями, що займаються розробкою джерел стабілізованої реактивної потужності, для дослідження їх характеристик.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Для роботи висунуто основні теоретичні положення, які були обговорені на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників та студентів університету при участі працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних підприємств.

Публікації: За результатами досліджень опубліковано тези доповідей [40].

Аналіз пристроїв КРП в електричних мережах промислових підприємств 3



Пристрої FACTS та їх ієрархія

Порівняльний аналіз методів керування пристроями КРП відносно параметрів електричної мережі 4

Метод керування	Опис	Переваги	Недоліки
За часом роботи навантаження	Регулювання роботи КРП відповідно до пікових і непікових періодів навантаження.	Оптимізація роботи за графіком, зниження енергоспоживання в непікові години.	Недостатня адаптивність до раптових змін у навантаженні, потреба в точному прогнозуванні.
За струмом	КРП активується при досягненні певного рівня струму, що свідчить про підвищене навантаження на мережу.	Швидка реакція на коливання навантаження, ефективна компенсація в реальному часі.	Може спрацювати на тимчасові коливання струму, що може призвести до зайвих включень.
За напругою вузла під'єднання	КРП активується або змінює режим роботи при досягненні певного рівня напруги у точці підключення.	Підтримання стабільної напруги у вузлі під'єднання, запобігання перенапрузі або зниженню напруги.	Може викликати часті включення і виключення при нестабільній напрузі, особливо в малих мережах.
За споживаною реактивною потужністю (РП)	Керування КРП на основі аналізу рівня споживання реактивної потужності навантаження в режимі реального часу.	Точна компенсація відповідно до фактичного навантаження, зменшення втрат на передачу енергії.	Потребує високої точності вимірювання РП, може мати затримку в реакції на швидкі зміни навантаження.
За коефіцієнтом потужності (cosφ)	Активується при зниженні коефіцієнта потужності нижче заданого рівня, забезпечуючи його підтримання.	Підтримка оптимального коефіцієнта потужності, що покращує енергоефективність мережі.	Залежність від точності вимірювання cosφ, можливі зайві спрацювання при швидких коливаннях.

Алгоритми оптимального керування потужностями КУ

Порівняльна таблиця методів забезпечення вхідної РП

Метод 1 - Забезпечення в.р.п. по мінімуму втрат мереж окремого дерева		$Q^*R_i \rightarrow \min$			
Х-ки Вузли	1	2	3	4	
К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200	
Втрати активної потужності до встановлення КУ ΔP , кВт	7,45	14,77	6,429	4,032	
Втрати активної потужності після встановлення КУ ΔP , кВт	1,862	1,278	2,315	1,792	
Метод 2 - Забезпечення в.р.п. по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж		$\frac{(2Q_i Q_j - Q_i^2)R_{ij}}{U^2} \rightarrow \max$			
К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200	
Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	1,746	3,27	1,6	1,232	
Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	0,815	0,82	0,914	0,784	
Метод 3 - Забезпечення в.р.п. по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з живильною лінією		$\frac{2Q_i R_{ij} \sum_{j=1}^n Q_j - Q_i^2 R_{ij}}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_j - Q_i^2)R_{ij}}{U^2} \rightarrow \max$			
К-сть секцій КУ, які необхідно ввімкнути	400	600	300	200	
Втрати активної потужності до встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	4	5,526	3,854	3,4858	
Втрати активної потужності після встановлення КУ $\delta(\Delta P)$, кВт	1,923	2,231	2,098	2,045	

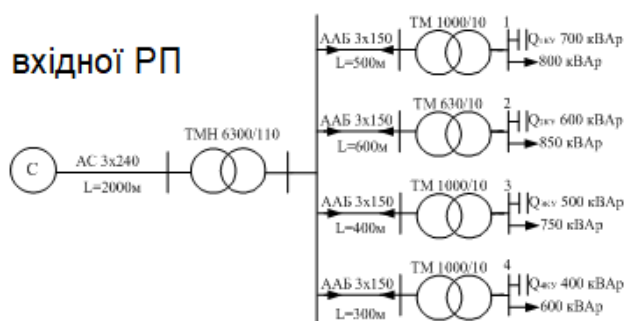


Схема розподільної мережі

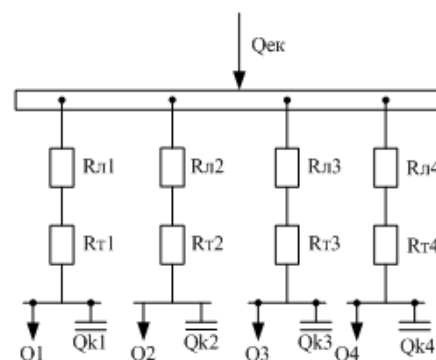
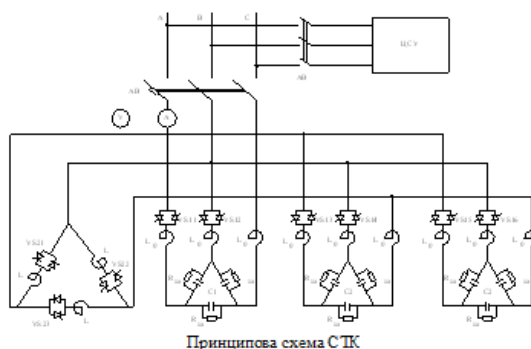


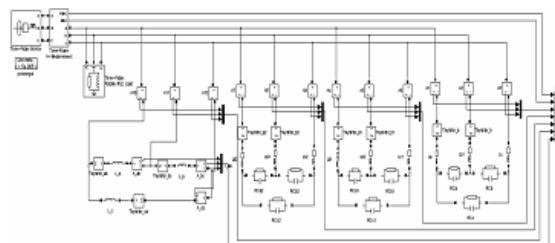
Схема заміщення розподільної мережі

Модель СТК в MATLAB Simulink

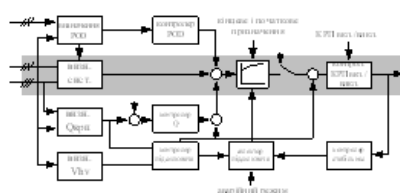
8



Принципова схема СТК

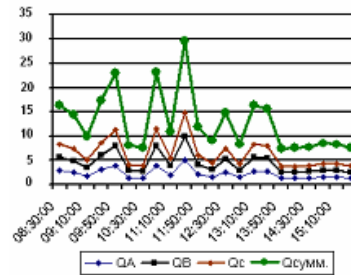


Модель СТК

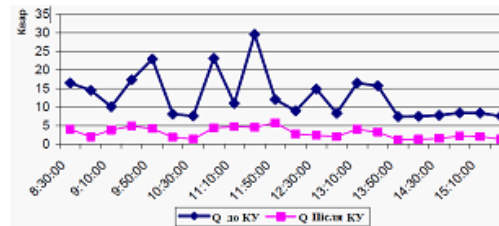


Результати моделювання основних режимів роботи СТК

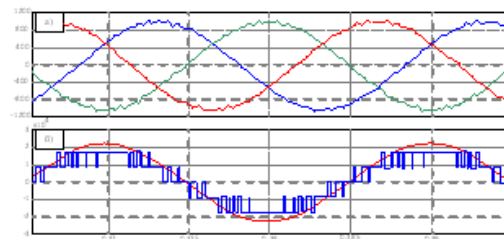
9



Графік вузла навантаження до КРП за допомогою СТК



Графік вузла навантаження до і після установки СТК



Режим споживання номінальної реактивної потужності а) фазні струми; б) лінійна напруга перетворювача (синім) і лінійну напругу мережі (червоним)

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

10

Характеристика потенційних клієнтів.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Стимулювання до компенсації реактивної потужності	Енергопостачальні компанії, споживачі електроенергії	Конфігурація КРП під конкретний об'єкт	Адаптивність, надійність, простота, ефективність, відносна дешевизна

Фактор загрози

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
Складне економічне становище в країні	Зменшення попиту у зв'язку з необхідними витратами	Зниження попиту
Необізнаність	Малий рівень компетенції у питаннях компенсації реактивної потужності	

Фактор можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
Підтримка	Подальше обслуговування після реалізації	Зростання зацікавленості
Зростання попиту на енергозбереження	Заощадження грошових коштів при споживанні електроенергії	

Висновки по роботі

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Запропоновано метод керування пристроєм БСК для забезпечення плавного (безперервного) регулювання РП. Запропонований метод КРП підвищує ефективність компенсатора РП за рахунок зменшення кількості конденсаторів в батареї, що дозволяє здійснювати плавне (безперервне) регулювання РП.
2. Розроблено математичну модель електричної мережі з СТК для КРП, яка дає змогу дослідити ефективність обраного методу роботи системи керування пристроєм СТК.
3. Досліджено різні режими роботи СТК на отриманій моделі з метою налаштування цифрової системи управління при різних змінних графіках навантажень споживачів електричної енергії.
4. В цілому було показано, що розробка та впровадження передових методів керування пристроями КРП є важливим завданням для електричних мереж промислових підприємств. Сучасні методи автоматизації та моделювання, можуть істотно підвищити ефективність роботи мереж і покращити якість електроенергії, що постачається. Шляхом рішення оптимізаційних задач за допомогою математичних моделей, які здатні відтворювати основні властивості реальних електричних мереж.

Проведено аналіз стартап проекту, було продемонстровано технічну сторону питання та доцільність проекту, аналіз ринкових можливостей показав, представлена методика орієнтована на широку аудиторію ринку енергетики і є вигідною для всіх груп споживачів.

В п'ятому розділі виконано аналіз фізичних та психофізіологічних факторів, що впливають на електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який буде здійснювати експлуатацію силового обладнання, описано технічні рішення з безпечної експлуатації, та рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.

