МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого
Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

«До захисту в ЕК»	**«До захисту допущено»**
Директор інституту (декан факультету)	Завідувач кафедри
_____ Блаженко С.І.	_____ Балюта С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)	(підпис) (прізвище та ініціали)
«___» _____ 20__ р.	«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

з спеціальності _141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»_____
(шифр та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»
на тему: «Енергоефективність підвищення ступеню компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових та міських об'єктів»

Виконав: здобувач _2___ курсу, групи ___ЗЕЛ-2-3М_____

_____Кобець Віталій Вячеславович___ _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____Балюта Сергій Миколайович_____ _____
(прізвище , ім'я та по батькові) (підпис)

Рецензент ___Бондар В.І.___ _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що в цій дипломній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.
Здобувач _____
(підпис)

Київ 2021 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого
Кафедра _____Електропостачання та енергоменеджменту_____
Освітній ступінь_____магістр_____
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕПЕМ
_____/Балюта С. М./
"09" листопада 2020 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

_____Кобцю Віталію Вячеславовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **« Енергоефективність підвищення ступеню компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових та міських об'єктів»**
керівник роботи _Балюта Сергій Миколайович, професор_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від " 09 "листопада 2020 р. № 935-кс
2. Строк подання здобувачем роботи_____05 лютого 2021 року
3. Вихідні дані до роботи _виконати дослідження оптимальної компенсації реактивної потужності на рівні споживачів в системах електропостачання промислових підприємств і міських електричних мережах методами штучного інтелекту, виконати аналіз співвідношення споживання активної та реактивної потужності електроприймачами промислових підприємств. Провести дослідження енергоефективності режимів систем електропостачання при проведенні компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів.___
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз стану проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах систем електропостачання. 2. Оптимізація реактивної потужності в системі електропостачання як однокритеріальна задача. 3. Дослідження збільшення ступеню компенсації реактивної потужності безпосередньо у споживачів в системах електропостачання. 4. Дослідження впливу збільшення ступеню компенсації реактивної потужності на витрати кабельної продукції.
5. Перелік графічного матеріалу
_____25 слайдів_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання____09 листопада 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Отримання завдання на магістерську роботу	09.11.2020 р.	
	Вступ	10-12.11.2020 р.	
	Аналіз стану проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах систем електропостачання	13-20.11.2020 р.	
	Методи і засоби компенсації реактивної потужності у науковій та технічній літературі	20-25.11.2020 р.	
	Підходи до вирішення проблеми компенсації реактивної потужності	25-30.11.2020	
	Оптимізація реактивної потужності в системі електропостачання як однокритеріальна задача	01-05.12.2020 р.	
	Оптимізація реактивної потужності з використанням генетичного алгоритму	06-10.12.2020 р.	
	Дослідження збільшення ступеню компенсації реактивної потужності безпосередньо у споживачів в системах електропостачання	11-16.12.2020 р.	
	Основні споживачі реактивної потужності промислових підприємств	17-25.12.2020 р.	
	Система електропостачання промислового підприємства № 1	11-15.01.2021 р.	
	Дослідження впливу збільшення ступеню компенсації реактивної потужності на витрати кабельної продукції	15-17.01.2021 р.	
	Математична модель об’єкта дослідження	18-21.01.2021 р.	
	Оформлення пояснювальної записки	22-28.01.2021 р.	
	Оформлення графічної частини роботи (презентація)	01-03.02.2021 р.	
	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	05.02.2021 р.	

Здобувач _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кобець В.В. Енергоефективність підвищення ступеню компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових та міських об’єктів. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Освітньо-професійна програма: Електротехнічні системи електроспоживання. Магістерська робота. Національний університет харчових технологій. Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого. Кафедра електропостачання та енергоменеджменту. – Київ.: НУХТ, 2021.

Стор. - __; рис. - ; табл. - ; джерел – .

У магістерській роботі виконано дослідження оптимальної компенсації реактивної потужності на рівні споживачів в системах електропостачання промислових підприємств і міських електричних мережах методами штучного інтелекту, Виконано аналіз співвідношення споживання активної та реактивної потужності електроприймачами промислових підприємств. Проведено дослідження енергоефективності режимів систем електропостачання при проведенні компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів. Запропоновано метод визначення оптимального розміщення і вибору величини джерел реактивної потужності з використанням генетичних алгоритмів в системі електропостачання промислових та цивільних об’єктів. Проведено оцінку втрат активної потужності і витрати на кабельну продукцію при проектуванні систем електропостачання у випадку підвищення ступеню компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів .

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, конденсаторні батареї, втрати потужності, режим напруги, багатоцільова оптимізація

ANNOTATION

Kobets V.V. Energy efficiency of increasing the degree of reactive power compensation in the power supply systems of industrial and urban facilities. 141 - Power engineering, electrical engineering and electromechanics. Educational and professional program: Electrical power consumption systems. Master thesis. National University of Food Technology. Educational and Scientific Engineering and Technical Institute. acad. I.S. Gulogo. Department of Power Supply and Energy Management. - Kyiv .: NUHT, 2021.

P. - __; Fig. -; table. -; sources.

In the master's work the research of optimal compensation of reactive power at the level of consumers in systems of power supply of industrial enterprises and city electric networks by methods of artificial intelligence is executed. The study of energy efficiency of modes of power supply systems during reactive power compensation at the level of electric receivers is carried out.

A method for determining the optimal location and selection of the magnitude of reactive power sources using genetic algorithms in the power supply system of industrial and civil facilities is proposed. The estimation of active power losses and expenses for cable products at designing of power supply systems in case of increase of degree of compensation of reactive power at the level of electric receivers is carried out.

Keywords: reactive power compensation, capacitor banks, power losses, voltage mode, multi-purpose optimization.

АННОТАЦИЯ

Кобец В.В. Энергоэффективность повышение степени компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных и городских объектов. 141 - Электроэнергетика, электротехника и электромеханика. Образовательно-профессиональная программа: Электротехнические системы электропотребления. Магистерская работа. Национальный университет пищевых технологий. Учебно-научный инженерно-технический институт им. акад. И.С. Гулого. Кафедра электроснабжения и энергоменеджмента. - Киев .: НУХТ, 2021.

Стр. - __; рис. -; табл. -; источников -.

В магистерской работе выполнено исследование оптимальной компенсации реактивной мощности на уровне потребителей в системах электроснабжения промышленных предприятий и городских электрических сетях методами искусственного интеллекта, Выполнен анализ соотношения потребления активной и реактивной мощности электроприемниками промышленных предприятий. Проведено исследование энергоэффективности режимов систем электроснабжения при проведении компенсации реактивной мощности на уровне электроприемников. Предложен метод определения оптимального размещения и выбора величины источников реактивной мощности с использованием генетических алгоритмов в системе электроснабжения промышленных и гражданских объектов. Проведена оценка потерь активной мощности и затраты на кабельную продукцию при проектировании систем электроснабжения в случае повышения степени компенсации реактивной мощности на уровне электроприемников.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, конденсаторные батареи, потери мощности, режим напряжения, многоцелевая оптимизация

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……...9

ВСТУП…….....11

РОЗДІЛ 1. Аналіз стану проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах систем електропостачання…….....13

1.1 Стан проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах України……13

1.2 Методи і засоби компенсації реактивної потужності у науковій та технічній літературі……...15

1.3 Підходи до вирішення проблеми компенсації реактивної потужності……..21

Висновки до розділу 1 ……24

РОЗДІЛ 2. Оптимізація реактивної потужності в системі електропостачання як однокритеріальна задача ……26

2.1. Постановка задачі оптимізації ……26

2.2. Математичні моделі і методи розв'язання задач оптимізації реактивної потужності ……27

2.3. Оптимізація реактивної потужності з використанням генетичного алгоритму……...37

2.4. Порівняльний аналіз оптимізації з використанням методів Лагранжа і генетичного алгоритму.....49

Висновки до розділу 2 …….. .58

РОЗДІЛ 3. Дослідження збільшення ступеню компенсації реактивної потужності безпосередньо у споживачів в системах електропостачання ……..59

3.1. Постановка завдання дослідження …….. 59

3.2. Основні споживачі реактивної потужності промислових підприємств..61

3.3. Система електропостачання промислового підприємства № 1……. 64

3.4. Математична модель системи електропостачання промислового підприємства ……69

3.5. Оптимізація реактивної потужності з використанням генетичних алгоритмів …… 74

3.6. Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість вузлів навантаження з асинхронними двигунами ……82

3.7. Результати рішення задачі оптимізації реактивної потужності …….88

3.8. Оптимізація реактивної потужності для підприємства № 2 ……..95

3.9. Оптимізація реактивної потужності для міської електричної мережі...98

Висновки до розділу 3 ……..…103

РОЗДІЛ 4. Дослідження впливу збільшення ступеню компенсації реактивної потужності на витрати кабельної продукції……105

4.1. Постановка задачі……105

4.2. Математична модель об’єкта дослідження ……..105

4.3. Результати рішення оптимізаційної задачі……...107

4.4. Вплив довжини кабелю на термін окупності при високому ступені компенсації реактивної потужності……..110

Висновки до розділу 4…….116

ВИСНОВКИ……..117

Список використаних джерел …….119

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхроннй двигун

АСК – асинхронізований синхронний компенсатор, в тому числі з маховиком

АСГ – асинхронізований генератор

АС ЕМПЧ – асинхронізований синхронний електромеханічний перетворювач частоти

БК – батарея конденсаторів

БСК – батареї статичних конденсаторів

ВБК – високовольтні батареї конденсаторів

ВФТ – фазоповертаючий трансформатор

ДРП – джерело реактивної потужності

КЛ – кабельна лінія

КРП – компенсація реактивної потужності

КУ – конденсаторні установки

ПЛ – повітряна лінія

ЛЕП – лінії електропередач

НБК – низьковольтні батареї конденсаторів

ОРПП – об'єднаний регулятор потоків потужності

РП – реактивна потужність

РШ – розподільна шафа

СЕП – система електропостачання

СД – синхронний двигун

СК – синхронний компенсатор

СКРМ – статичні компенсатори реактивної потужності

ССПК – синхронний статичний поздовжній компенсатор реактивної

СТАТКОМ – статичний синхронний компенсатор реактивної потужності

СТК – статичні тиристорні компенсатори

ТП – трансформаторна підстанція

ФПП – фазоповоротний пристрій

FACTS – системи гнучкого регулювання передачі електроенергії змінного струму

IGCT – замикаючі тиристори

IGBT – керовані біполярні транзистори

потужності на базі перетворювача напруги

ВСТУП

Проблема енергоефективності систем електропостачання (СЕП) промислових підприємств і міст невід'ємно пов'язана з питанням зниження втрат електроенергії.

Зміна характеру навантаження промислових підприємств і інфраструктури міст привели до збільшення числа і потужності електроприймачів, що працюють з використанням електромагнітного поля. Електроприймачі, робота яких базується на використанні змінного електромагнітного поля, споживають як активну потужність (P), так і реактивну потужність (Q). Основними системами і установками для будь-яких виробничих процесів служать електродвигуни технологічного обладнання, електронагрівальні установки, перетворювачі, трансформатори, системи вентиляції та кондиціонування, зварювальне обладнання, системи освітлення.

Вироблення активної потужності здійснюється генераторами електричних станцій, вітроустановками, сонячними батареями та іншими поновлюваними джерелами. Реактивна потужність, на відміну від активної потужності, може генеруватися компенсують пристроями (КУ) - конденсаторними батареями, синхронними компенсаторами, статичними джерелами реактивної потужності. При транспортуванні реактивної потужності по електричних мережах виникають додаткові втрати активної потужності, які покриваються активною енергією генераторів, т. б. додатковою витратою палива.

Таким чином, вирішення задачі зниження втрат енергії потребує дослідження питання зменшення споживання реактивної потужності від генераторів станцій. Встановлення джерел реактивної потужності і компенсація реактивної потужності у споживача - це основний шлях до підвищення економічності енергосистеми, оскільки зменшуються втрати активної потужності, стабілізується рівень напруги у електроприймачів, тим самим збільшується пропускна спроможність елементів СЕП.

На основі вище зазначеного можна зробити висновок, шо актуальним є аналіз електроспоживання та вибору методів компенсації реактивної

потужності (КРП). Слід зазначити, що через розгалуженість і складність схем електропостачання міських електричних мереж та мереж електропостачання промислових підприємств, ефект від КРП в повній мірі не вивчений. Тому необхідним є проведення комплексного дослідження компенсації реактивної потужності (РП) на рівні споживачів , аналізу її енергоефективності та визначення області застосування в електричних мережах 10 (6) - 0,4 кВ СЕП промислових підприємств і міст, що визначає актуальність теми даної дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОЛЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Стан проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах України

В останні роки підвищення якості електроенергії НЕК Укренерго приділяє велику увагу, тому що якість електроенергії може істотно впливати на її витрати, надійність СЕС, а також технологічний процес виробництва. Наявність значних перетікань реактивної потужності в мережах електропостачання не є ПЯЕ, але разом з тим воно веде до зниження напруги на шинах споживача, а це один з показників якості, невиконання якого, в свою чергу, призводить до погіршення техніко-економічних показників СЕС і до збитку виробництва [29-34].

При цьому оцінити збиток дуже складно через різний ступінь впливів електроенергії за окремими показниками, які залежать від складу електрообладнання та режимів його роботи. Дослідження впливу якості електроенергії на роботу електрообладнання [35], показали, що при невиконанні нормативних ПКЕ відбувається скорочення терміну служби:

- силовий трансформаторів 10 / 0,4 - в 1,2-1,8 рази;
- асинхронних електродвигунів - в 1,5-2,5 рази;
- електроприводів, пристроїв плавного пуску і перетворювачів частоти - в 2,0-4,1 рази.

Ефективна робота електрообладнання залежить від одного з найважливіших ПКЕ - гранично допустимого відхилення напруги, яке в свою чергу залежить від коефіцієнта реактивної потужності.

В [44] відзначено, що «перед людством стоїть величезна енергетична дилема. З одного боку, споживання енергоресурсів має і неминуче буде зростати: за підрахунками експертів, воно збільшиться вдвічі до 2050 р З іншого боку, щоб уникнути незворотних змін клімату до 2050 р, необхідно вдвічі знизити викиди CO_2. Таким чином, вирішуючи питання

енергозбереження і зниження втрат, покращуються економічні показники, ресурсозберігаючі та екологічні.

Розподільні електричні мережі України напругою 0,4…35 кВ є кінцевою ланкою в системі забезпечення споживачів електричною енергією. Ці мережі перебувають у безпосередній взаємодії як зі споживачем, так і з районними та магістральними електричними мережами. Тому стан та функціонування розподільних електричних мереж впливають на показники надійності, якості і ефективності роботи об'єднаної енергосистеми України. Сумарна довжина розподільних електричних мереж вказаних класів напруги на сьогодні в Україні складає: 0,4 кВ – 449832 км; 6-10 кВ – 332568 км і має тенденцію до щорічного зростання. Передавання електричної енергії в Україні супроводжується значними втратами електроенергії в електричних мережах енергосистеми, які сягають до 12…15 % від загального обсягу виробленої електроенергії, в тому числі у розподільних мережах – 6…9 %. Ця обставина вказує на необхідність підвищення енергоефективності розподільних мереж, мереж промислових підприємств та міст. Зростання споживання електроенергії обумовлює необхідність підвищення ефективності функціонування існуючих електричних мереж шляхом збільшення їх пропускної спроможності та зменшення втрат електроенергії в них. При постійному зростанні рівня тарифів для кінцевого споживача важливою стає проблема забезпечення відповідного рівня якості електричної енергії, а також надійного, безперебійного електропостачання. Проблеми якісного електропостачання в розподільних електричних мережах вирішується шляхом використання сучасного електрообладнання, забезпечення необхідних перетікань потужності засобами мережевої автоматики та компенсації реактивної потужності. В комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії проблема компенсації реактивної потужності завжди займала важливе місце [2]. Зокрема, аналіз причин виникнення та розвитку найбільших аварій і технологічних порушень в енергосистемах і енергооб'єднаннях різних країн, які призвели до відключення значного обсягу

споживачів [2] показав, що однією з важливих причин є, дефіцит реактивної потужності в енергооб'єднаннях і недостатня потужність встановлених джерел реактивної потужності.

В Україні велика частина заходів з компенсації реактивної потужності спрямована на мережі високої і надвисокої напруги. При рівних умовах в розвинених країнах, таких як Німеччина, Канада, США, більша частина зусиль на компенсацію реактивної потужності спрямовується саме на мережі низької напруги.

За даними [43] в Німеччині установка пристроїв компенсації РП (компенсуючих установок - КУ) дозволила в 2007 році знизити збитки приблизно на 5,5 млрд кВтгод, і тим самим уникнути викидів майже трьох мільйонів тон $C0_2$ в рік.

Наприклад, ефект компенсації реактивної потужності в житлово-побутовому секторі в Перу показав, що установка конденсаторів сумарною потужністю 37000 кВАр в 114000 домоволодінь району Інфантас в північній частині Ліми, підвищила середньозважений коефіцієнт потужності розподільної мережі з 0,84 до 0,93, що дозволило щорічно заощаджувати приблизно 280 кВтгод на кожен встановлений кВАр реактивної потужності або всього близько 193000 МВт-год на рік [47].

Таким чином, вирішення питань компенсації реактивної потужності є одним з важливих аспектів забезпечення надійності електропостачання, ефективного використання електроенергії в промисловості та в міських електричних мережах [3].

1.2 Методи і засоби компенсації реактивної потужності у науковій та технічній літературі

Проблема компенсації реактивної потужності в більшості випадків вирішувалася для промислових споживачів і для електричних мереж. Однак, в зв’язку із зростанням споживання електроенергії у побутовому секторі сьогодні актуальним є розгляд питання також для побутових споживачів. За останні 10-15 років були проведені дослідження з питань компенсації реактивної

потужності, запропоновані нові методи, підходи, алгоритми, засоби та пристрої вирішення поставленої задачі.

В роботі [4], представлений метод багатоцільової оптимізації компенсації реактивної потужності (КРП) в системі електропостачання промислового підприємства, який полягає у визначенні місця розташування пристроїв КРП і значень шунтуючих ємностей. Для багатоцільової оптимізації використовуються еволюційні алгоритми, що дозволяє одночасно і незалежно оптимізувати за декількома параметрами. В результаті можна отримати множину рішень, що є близькими до оптимальних (множина Парето) і вибрати компромісний варіант.

В роботі [5] представлений аналіз стану компенсації реактивної потужності в Україні, а також результати досвіду розвинених країн у використанні для компенсації реактивної потужності пристроїв СТАТКОМ, вольтододатніх трансформатори, FACTS.

В роботі [6] розглядається питання енергозбереження шляхом компенсації реактивної потужності у споживача. Авторами показано, що при реалізації заходів з енергозбереження необхідно розглядати засоби компенсації реактивної потужності безпосередньо біля приймача енергії або споживача, оскільки реактивна потужність, як і активна, враховується в тарифі за електроенергію. Враховуючи зростання споживання електроенергії в побутовому секторі актуальним є питання компенсації реактивної потужності в житловому секторі з урахуванням однофазних споживачів.

Авторами роботи [7] наведені результати досліджень компенсації реактивної потужності в міських електричних мережах, які показали можливості економічно доцільного регулювання компенсації реактивної потужності міських мереж і ТП - 6 (10)/0,4 кВ за допомогою сучасних конденсаторних установок (КУ) номінальною напругою конденсаторів 0,4 кВ.

В статті [8] розглянуті питання впровадження компенсуючих установок у електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах. Автори роблять висновок, шо в сучасних економічних умовах підприємству економічно

доцільно вкладати кошти в засоби компенсації реактивної потужності, що забезпечить більшу економічну ефективність в порівнянні з їх вкладення в інші виробничі та комерційні операції. Для реалізації вказаних положень доцільно розробити спрощений метод обгрунтування та вибору засобів компенсації реактивної потужності

В роботі [9] запропоновано новий підхід до формування економічних взаємини споживачів та постачальника електричної енергії для забезпечення надійності електропостачання. Зокрема, запропонована система взаємовідносин між споживачами і постачальниками електричної енергії, яка передбачає : 1) у випадку забезпечення постачальником енергії договірного (наднормованого) рівня надійності електропостачання споживач повинен оплатити надбавку до тарифу за надійність; 2) у випадку не забезпечення визначеного рівня надійності електропостачання, постачальник енергії зобов'язаний виплатити підприємству штраф за недовідпуск енергії в розмірі завданих збитків (знижка до тарифу); 3) з метою отримання прибутку за рахунок додатково відпущеної споживачам електроенергії електропередавальна організація може проводити заходи для забезпечення надійності електропостачання.

В статті [10] наведені результати аналізу стану питання з компенсацією реактивної потужності в електричних мережах України. Авторами показано, що величина втрат реактивної потужності в елементах мережі може досягати рівня реактивної потужності, що споживається електроприймачами. Автори наголошують на тому, що при реалізації заходів з компенсації реактивної потужності в першу чергу необхідно реалізовувати заходи направлені на зниження споживання реактивної потужності за допомогою встановлених засобів КРП,

В роботі [11] розглянуто питання компенсації реактивної потужності в системах побутового електроспоживання. Для вирішення завдання компенсації реактивної потужності в міських електричних мережах авторами запропоновані такі заходи:

- централізована (загальна) компенсація РП на підстанціях, що передбачає здійснення заходів із забезпечення ПКЕ: вирівнювання напруг фаз, фільтрацію струму, а також установку компенсаторів реактивної потужності;

- індивідуальна компенсація реактивної потужності на рівні кожної квартири або стояку шляхом підключення установок компенсації реактивної потужності (косинусного конденсатора невеликої ємності).

В роботі [12] наведена методика вибору засобів КРП та результати порівняння різних варіантів компенсації реактивної потужності. Зокрема представлений порядок вибору конденсаторних батарей нерегульованих компенсуючих пристроїв, регульованих за часом компенсуючих пристроїв, засобів індивідуальної компенсації реактивної потужності, автоматичних конденсаторних установок.

В роботі [13] розглянуті особливості реалізації заходів зниження втрат електроенергії в електричних мережах Автори звертають увагу на ту обставину, що в мережах сільської місцевості найбільш ефективною є установка компенсуючих пристроїв поруч з побутовими споживачами, що дозволяє не лише знизити втрати енергії, а при наявності засобів автоматики і підтримувати задані рівні напруги у споживача.

В статті [14] розглянуті питання обстеження системи компенсації реактивної потужності промислового підприємства. При цьому вирішуються такі завдання: перевірка технічного стану засобів КРП; визначення економічно обґрунтованого ступеня КРП; оцінка компенсувальної спроможності наявних джерел реактивної потужності; аналіз фактичного завантаження елементів системи електропостачання; аналіз електромагнітної сумісності компенсуючих пристроїв з іншими елементами системи електропостачання; оцінка впливу компенсуючих пристроїв на режими системи електропостачання та якість електроенергії. Розглянута проблема оптимального розподілу джерел реактивної потужності в системі електропостачання з використанням спеціальних оптимізаційних програм.

В статті [15] розглядаються питання зниження втрат електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності. У роботі представлені результати порівняння двох варіантів компенсації реактивної потужності: з використанням високовольтних батарей конденсаторів (ВБК), а також за допомогою установки низьковольтних батарей конденсаторів (НБК). Авторами показано, що для досягнення необхідного коефіцієнта потужності раціонально використовувати конденсаторні установки на стороні низької так і високої напруги.

В статті [16] розглядаються питання компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з джерелами розосередженої енергетики. На основі представлених даних автор зробив висновок про те що, формування розподіленої енергетики максимально наближеної до споживача дозволяє знизити втрати в мережах за рахунок компенсації реактивної потужності.

В роботі [17] розглядаються питання компенсації реактивної потужності в умовах міських електричних мереж. Авторами виявлені такі особливості проблеми компенсації реактивної потужності: в промисловому виробництві спостерігається випереджаюче зростання споживання реактивної потужності в порівнянні з активною; зростання споживання реактивної потужності в міських електричних мережах; в сільських електричних мережах збільшується споживання реактивної потужності; внаслідок широкого впровадження електронних пристроїів регулювання у електричних мережах збільшується рівень вищих гармонік. Для компенсації реактивної потужності автори рекомендують використовувати статичні тиристорні компенсатори.

В роботі [18] авторами розглянуті новітні технології компенсації реактивної потужності. Зокрема, розглянуті характеристики керованих пристроїв FACTS; принцип дії і характеристики статичних тиристорних компенсаторів (СТК), а також статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності СТАТКОМ, наведені особливості застосування пристроїв компенсації реактивної потужності на базі FACTS. На основі аналізу використання новітніх технологій компенсації реактивної потужності в енергосистемах автори роблять висновок про те, що відсутність контролю за балансом реактивної потужності в

енергосистемі може привести до негативних наслідків. Запобігання цих процесів потрібно здійснювати в темпі процесів, які відбуваються в енергосистемі. Вирішити ці завдання і створити інтелектуальні систем електропостачання можна шляхом використання керованих систем змінного струму FACTS в поєднанні з сучасними інформаційними і комп'ютерними технологіями.

В роботі [19] розглянуті питання оптимізації компенсації реактивної потужності в розподільних мережах для забезпечення режиму напруги Авторами представлено метод визначення місць установки і розрахунку оптимальної потужності конденсаторних батарей в мережі напругою 0,4 кВ, що забезпечить нормовані відхилення напруги у споживачів.

В статті [20] представлені методи дискретної оптимізації систем електропостачання. Запропоновано використання методу нормованих функцій для розробки алгоритму оптимізації СЕП, при цьому елементи СЕП представляються моделями дискретного лінійного програмування. В роботі наведено алгоритм вибору місць установки і потужностей конденсаторних батарей (БК) в розподільних мережах 6-10 / 0,4 кВ з урахуванням регулювального ефекту за напругою - мінімізація сумарної вартості БК при забезпеченні обмежень допустимих відхилень напруги з урахуванням дискретності шкали стандартних потужностей комплектних БК і їх вартостей.

Питанням розміщення конденсаторів і визначення їх оптимальної потужність для розподільних систем електропостачання присвячена робота [21]. Автори представили метод оптимізації режимів роботи радіальної та замкненої електричної мережі, а також метод оптимальних рішень розміщення конденсаторів з використанням еволюційно-імітаційного моделювання.

Питання покращення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільні мережі розглянуто в роботі [22]. Автори досліджують підвищення економічної ефективності компенсації реактивної потужності у розподільних мережах для компенсації потужності намагнічування трансформаторів шляхом збільшення потужності низьковольтних конденсаторів з вищою номінальною

потужністю на обраних підстанціях замість встановлення конденсаторів на шинах середньої напруги. Показано, що установка конденсаторів на обраних станціях може бути ефективним способом зменшення втрат енергії в розподільній мережі

В роботі [23] розглядаються питання компенсації реактивної в системах розподіленої генерації. Авторами показано, шо генерація реактивної потужності поблизу навантаження за допомогою джерел розподіленої генерації забезпечує значні економічні вигоди, такі як зменшення втрат, покращення локальної напруги, постачання електроенергії в віддалені райони, поліпшення коефіцієнту потужності, зменшення загальної вартості системи.

В статті [24] представлений огляд сучасних технологій компенсації реактивної потужності. Описані приклади проектів використання сучасних компенсаторів. Показано, що використання компенсаторів дозволяє підвищити продуктивність енергетичних систем, надійність їх роботи і якість електроенергії, що поставляється споживачам. Автори обгрунтовують тезу, що застосування вказаних засобів підвищує керованість електричної мережі і дозволить комунальним підприємствам скоротити інвестиції в лінії передачі.

У роботі [25] представлені евристичні стратегії, що базуються на варіаційних методах, для вибору джерел реактивної потужності в радіальних розподільних систем з трьома джерелами живлення.

1.3 Підходи до вирішення проблеми компенсації реактивної потужності

Вирішення проблем компенсації реактивної потужності в значній мірі передбачає економію грошових та матеріальних ресурсів, забезпечує підвищення якості електричної енергії. Традиційними джерелами реактивної потужності є:

- високовольтні лінії електропередачі повітряні і кабельні;
- силові статичні конденсатори;
- синхронні двигуни в режимі перезбудження;
- генератори електростанцій;

- синхронні компенсатори;

- статичні тиристорні компенсатори;

- компенсаційні перетворювачі зі штучною комутацією.

На сьогодні широко розробляються та застосовуються сучасні пристрої, системи для компенсації реактивної потужності. Вони дозволять вирішувати проблему компенсації реактивної потужності і інші проблемні питання. В світі вже широко застосовуються такі пристрої та системи як СТАТКОМ, вольтододатні трансформатори, FACTS - системи гнучкого регулювання передачі електроенергії змінного струму, які застосовуються для корекції коефіцієнта потужності, мінімізації втрат. СТАТКОМ дозволяє здійснювати як індуктивну, так і ємнісну компенсацію реактивної потужності. Для досягнення необхідного коефіцієнта потужності доцільно використовувати конденсаторні установки на стороні низької і високої напруги трансформаторної підстанції . Для цього застосовують установки відповідно високовольтних батарей конденсаторів (ВБК) та низьковольтних батарей конденсаторів (НБК). Безінерційне регулювання реактивної потужності забезпечують статичні компенсатори реактивної потужності (СКРП). В Україні ці пристрої тільки починають застосовувати. На даний час широке застосування знаходять традиційні, перевірені роками засоби компенсації реактивної потужності.

При правильному підході до проблеми компенсації реактивної потужності і вибору відповідних методів її вирішення можна отримати економію грошових та матеріальних ресурсів, підвищити показники якості електричної енергії.

Для забезпечення енергоефективних режимів електричної мережі важливо визначити ступінь компенсації реактивної потужності.

Втрати активної потужності в електричній мережі визначаються наступним чином:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2 \left(1 + tg^2 \varphi\right)}{U^2} R = \frac{P^2 R}{U^2} + \frac{P^2 R}{U^2} tg^2 \varphi \quad (1.2)$$

де P, Q - активна і реактивна потужність;

U , R - напруга і опір мережі.

Вираз (1.2) показує, що при незмінних параметрах потужності, опору і напруги, втрати активної потужності пропорційні квадрату коефіцієнта реакгивної потужності, дивись рис. 1.3.

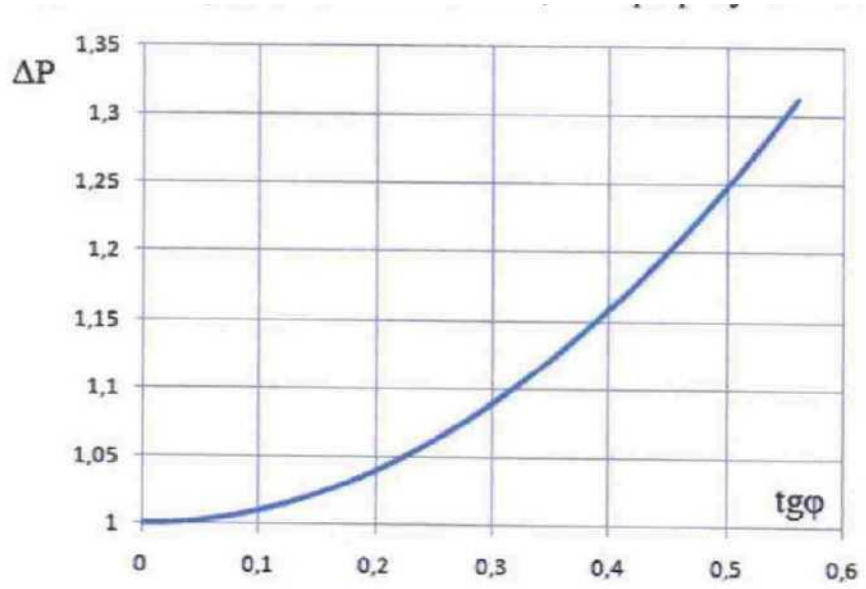


Рисунок 1.3 – Залежність втрат активної потужності від $tg\varphi$

Таким чином, щоб максимально зменшити втрати активної потужності, необхідно компенсувати реактивну потужність до нуля (1.3)

$$\Delta P = \frac{P^2 + \left(Q - Q_{KV}\right)^2}{U^2} R \qquad (1.3)$$

де Q_{KV} – потужність компенсуючого пристрою (КУ).

При цьому, для зменшення втрати електричної енергії, необхідно збільшити фінансові видатки на компенсуючі пристрої.

Інший аспект, при проектуванні системи електропостачання споживачів напругою 0,4 кВ і визначенні перетину струмоведучих жил ліній електропередачі (далі - перетин кабельних ліній), які мають довжину 50 м і більше, необхідно враховувати втрати напруги в лінії. Для забезпечення необхідного рівня напруги у електроприймачів необхідно зменшити опір

живильних кабельних ліній, що досягається збільшенням їх перетину або за рахунок використання двох паралельних ліній.

Максимальна компенсація реактивної потужності за рахунок зменшення втрат напруги дозволяє зменшити перетин протяжних кабельних ліній (1.4)

$$\Delta U = \frac{PR + \left(Q - Q_{KV}\right)X}{U} \qquad (1.4)$$

При зменшенні перетину, збільшується опір кабельної лінії, отже, і збільшуються втрати напруги. Це комплекс складних, взаємопов'язаних, і суперечливих завдань. З точки зору економії (зменшення витрат на втрати напруги) і екології (зниження викидів вуглекислого газу) більш рентабельним стає глибока компенсація реактивної потужності.

За останнє десятиліття більшість робіт, які досліджують проблеми реактивної потужності, присвячені теоретичним методам розрахунків втрат і регулювання напруги, або методів визначення оптимального розміщення засобів компенсації реактивної потужності [61, 62, 63, 64]. В даний час виникла нова проблематика, пов'язана з вибором і нормуванням коефіцієнта реактивної потужності, інакше кажучи, ступеню компенсації реактивної потужності.

У роботі вирішується питання визначення техніко-економічно доцільного ступеня компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів 0,4 кВ. При цьому, в якості цільової функції розглядаються показники енергоефективності споживачів на межі балансової належності з енергозбутовою компанією.

Висновки до розділу 1

1. Електричні мережі СЕП підприємств і міст напругою 10 (6) - 0,4 кВ за протяжністю складають близько 50% всіх електричних розподільних мереж, за рахунок яких здійснюється транспортування і розподіл електроенергії до кінцевих споживачів і електроприймачів. З огляду на це, надзвичайно важливого значення набуває питання зниження втрат активної та реактивної

енергії при її транспортуванні від джерел генерації в ЕЕС до споживачів, які використовують електроенергію на кінцевій стадії з частковим її перетворенням в інші види енергії.

2. Внаслідок технічного прогресу в значні мірі зросло споживання електричної енергії в побутовому секторі народного господарства, Це обумовлює необхідність розробки нових підходів до вирішення питання оптимізації режимів міських електричних мереж за рахунок компенсації реактивної потужності.

3. Встановлено, що існуючий ступінь КРП на рівні електроприймачів, який визначається нормативними документами, не є оптимальним, з огляду на те, що він обирається без врахування втрат потужності і напруги в мережі 0,4 кВ і за недостатньо обгрунтованим критерієм. Таким чином, оптимальний ступінь КРП вимагає відповідних досліджень для його обґрунтування.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЯК ОДНОКРИТЕРІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

2.1. Постановка задачі оптимізації

В електроенергетичних системах і системах електропостачання при роботі більшості електроприймачів, що включають в себе зазвичай електричні машини і апарати, в зв'язку з дефіцитом реактивної потужності виникає проблема її генерації поруч зі споживачем. Це обумовлено тим, що для створення змінного магнітного потоку у всіх випадках потрібна реактивна потужність, за допомогою якої реалізується функціональне призначення електрообладнання промислових підприємствах і електричних мереж змінного струму. З точки зору математики ця задача передбачає оптимізацію місць розміщення джерел реактивної потужності і подальший вибір значень КРП з метою мінімізації цільової функції. В якості цільової функції можна вибрати мінімум сумарних втрат активної потужності в електричних мережах і СЕП промислових підприємств. Оскільки КРП можна виконати за різними варіантами розміщення джерел реактивної потужності, тому виникає задача мінімуму витрат на КРП. Таким чином, необхідно вирішити оптимізаційну задачу, яка полягає у пошуку в деякому сенсі найкращого рішення або оптимального за мінімумом сумарних втрат активної потужності і за мінімуму витрат на пристрої КРП.

У зв'язку з тим, що не можливо забезпечити найкраще рішення у всіх сеансах, необхідно ввести поняття критерію оптимальності рішення задачі або цільової функції. За визначенням Л.І.Лопатнікова [70]: «Критерій оптимальності - показник, що виражає граничну міру економічного ефекту від прийнятого рішення для порівняльної оцінки можливих рішень (альтернатив) і вибору найкращого з них». Ю.С. Железко оптимізаційну задачу для КРП [71] сформулював наступним чином: «Завдання вибору оптимальної потужності і місць установки КУ в електричних мережах має на меті знаходження такого рішення, яке забезпечує максимальний економічний ефект при дотриманні всіх

технічних умов нормальної роботи електричних мереж і приймачів електроенергії ».

Для отримання максимального економічного ефекту при КРП доцільно від двокритеріальної задачі перейти до однокритеріального завдання - мінімізації фінансових витрат на оплату втрат і на установку пристроїв КРП.

У цьому розділі розглядаються питання обґрунтування застосування для вирішення цієї оптимізаційної задачі одного з методів штучного інтелекту, а саме, генетичного алгоритму. Виконаний також порівняльний аналіз методів класичного оптимізаційного методу Лагранжа і генетичного алгоритму.

2.2. Математичні моделі і методи розв'язання задач оптимізації реактивної потужності

Математичної формою критерію оптимальності є цільова функція f.

Приймемо наступні позначення:

x- це простір рішень;

D- обмеження, які накладають на пошук *X* в області допустимих рішень $X^{'}, X^{'} \subseteq X$.

R- множина невід'ємних дійсних чисел.

Тоді можна записати критерій оптимальності для функції *f:* $X^{'} \to R$

Рішення оптимізаційних задач передбачає розгляд одного з двох варіантів:

- отримати максимальний результат при заданих обмеженнях і умовах;

- використовувати мінімальні ресурси при заданих обмеженнях і умовах.

Таким чином, вимоги оптимізації можна записати виразами

$$f(x) \to \min \text{ або } f(x) \to \max$$

Використовуючи оптимізаційну функцію можна реалізувати процедуру порівняння варіантів рішення. У даній роботі розглядається задача знаходження мінімуму функції, тому, в подальшому, визначення оптимуму слід розуміти як досягнення мінімуму функції. При пошуку найменшого значення f рішення $x' \in X$ буде краще, ніж рішення $x' \in X'$, якщо $f(x) < f(x')$.

Іноді помилково при знаходженні оптимального рішення називають мінімальне значення цільової функції екстремумом. У випадках, коли при знаходженні оптимуму можуть бути встановлені обмеження (на змінні накладаються додаткові умови), то задача зводиться до пошуку «умовного» екстремуму і в якості оптимуму може бути отримано рішення, яке не відповідає екстремуму. Це обумовлено тим, що він не досягається введеними обмеженнями. Оптимум може бути локальним і глобальним.

Глобальний мінімум - це такий мінімум, який менше за всіх інших. Для пошуку глобального оптимуму необхідно знайти всі локальні, якщо це можливо, і вибрати найкращий варіант з точки зору цільової функції. Продовжуючи говорити про мінімізацію функції, точкою локального мінімуму називається $x^* \in D$, якщо $\forall x \in d\left(x^*, \varepsilon\right)$, істинно висловлювання

$$f(x^*) \le f(x)$$

Де $d\left(x^*, \varepsilon\right)$, ε - область точки x.

Точкою глобального мінімуму називається $x^* \in D$, якщо в жодній іншій точці області допустимих рішень функція не приймає менших значень: $f(x^*) \le f(x) \quad \forall x \in D$.

Отже, найменший з усіх **локальних мінімумів** - це глобальний мінімум.

До вирішення оптимізаційних завдань існує безліч підходів. При цьому ставиться головне завдання - це вибрати такий метод вирішення, який дозволить отримати кінцевий результат з найменшими витратами на обчислення, дасть можливість отримати найбільшу інформацію про отриманий вирішенні, зменшити можливі негативні наслідки від реалізованого рішення. В сучасних економічних умовах різко підвищилася ціна, яку доводиться платити підприємству за недостатньо обґрунтовані економічні рішення.

Вирішувати завдання оптимізації можна точно або наближено. При маленькій розмірності завдань не виникає проблем отримання гарантованого оптимального рішення. До методів точного рішення відносяться:

- метод повного перебору;

- метод спрямованого перебору;

-класичний метод пошуку екстремуму, заснований на апараті диференціального обчислення;

- методи динамічного програмування.

Методи пошуку оптимуму в залежності від стратегії ділять на: одномірні пошуки (Фібоначчі, золотого перетину і т.д.); чисельні методи (градієнта, найшвидшого спуску (підйому)); статистичні методи (метод Монте-Карло та інші).

Для врахування різного виду обмежень використовують методи лінійного програмування, нелінійного програмування. Окремим випадком нелінійного програмування є метод невизначених множників Лагранжа.

Зі збільшенням розмірності задачі експоненціально зростає кількість операцій. У цьому випадку застосовують еволюційні методи вирішення, тобто методи, де аналогічно природним процесам і законам еволюції відбувається пошук оптимуму. Еволюційні методи ділять на наступні групи: еволюційна стратегія [72, 73] (генетичні алгоритми, ройові алгоритми, і інші) і еволюційне програмування. Еволюційні методи вирішення оптимізаційних задач останнім часом набули широкого застосування при вирішенні різного виду інженерних задач. Для кожного класу оптимізаційних задач зазвичай висуваються такі критерії: ефективність, швидкодія, збіжність, вплив початкових умов завдання і параметрів алгоритму. Всі вони вимагають ретельного дослідження.

Нижче розглянуті деякі методи отримання оптимальних рішень.

Метод повного перебору це найбільш простий спосіб, який дозволяє знайти оптимальне рішення будь-якої задачі. Метод полягає у формуванні та послідовній оцінці всієї множини можливих рішень. Після отримання всіх рішень і їх оцінки, залишається тільки вибрати найкращий варіант.

$$f^{opt}\left(X^{opt}\right)=\min\left(f\left(X_1\right),f\left(X_2\right)\ldots f\left(X_n\right)\right),X_i\in D \qquad (2.1)$$

Де $f(X)$- скалярна цільова функція, для якої потрібно знайти мінімальне значення;

X - вектор змінних параметрів;

D - область допустимих значень

X^{opt} - оптимальне значення вектору змінних параметрів;

f^{opt} - оптимальне значення цільової функції.

Метод гарантує найкраще рішення. Але він може бути застосований лише для задач малої розмірності, оскільки при збільшенні розмірності задачі, експоненціально зростає кількість можливих рішень, тому потрібно неприпустимо великі витрати часу. Очевидно, що метод може застосовуватися тільки до малорозмірних завданням, і тому на практиці його застосування обмежене.

Як показано в описі повного перебору, формування та оцінка всіх можливих рішень є неефективним. Якщо використовувати відсікання рішень, які свідомо не можуть дати оптимальне рішення, то можливе отримання точного рішення без формування всіх можливих варіантів. Одним з найбільш ефективних методів для скорочення безлічі прийнятих рішень є **метод гілок і меж**. Метод був запропонований в 1960 році А. Ландо і А. Дойг [74].

Основу методу гілок і меж становить принцип «розділяй і володарюй». Множина усіх можливих рішень розбивається на підмножини (розгалуження) змінної, а аналіз підмножин (визначення кордонів) виключає з подальшого розгляду ті підмножини, в яких свідомо не міститься оптимальне рішення.

Певний клас завдань вимагає реалізації особливих правил розгалуження і визначення кордонів, а це призводить до сильної залежності ефективності методу від досвіду і вміння автора при конкретної реалізації [75]. У найгіршому випадку алгоритм, який реалізує метод гілок і меж, може звестися до повного перебору. Перевагами методу є універсальність, гарантоване отримання найкращого рішення, простота реалізації на ЕОМ.

Застосування методу «гілок і меж» в задачах оптимізації ускладнено, тому що такі завдання на практиці мають високу розмірність, що призводить до неприйнятно довгої роботи алгоритмів на основі цього методу.

Досить простим методом пошуку оптимального рішення задачі є довільна вибірка рішень - **випадковий пошук**. Суть методу полягає в тому, що за деяким законом розподілу випадковим чином генеруються і оцінюються довільні рішення X до тих пір, поки не буде знайдено досить гарне рішення. В даному методі пошук рішення може обмежуватися заданим часом або заданим числом ітерацій алгоритму. Як результат вибирається оптимальне рішення з усіх, які були сформовані в процесі виконання завдання.

В [73] встановлені умови, при виконанні яких метод випадкового пошуку можна успішно застосовувати:

- простір рішень містить високу частку задовільних рішень;

-простір рішень не є однорідним. Іншими словами, не можна визначити ознаки наближення до оптимального рішення.

Основна перевага даного підходу - це простота і циклічність, хоча вибірка довільних рішень з однаковою ймовірністю для всіх рішень може бути нетривіальним завданням [73].

$$f^{opt}\left(X^{opt}\right) \approx f\left(X_m\right) \qquad (2.2)$$

де значення X_m показало себе як оптимальне значення, наприклад, мінімуму

$$f\left(X_m\right) \leq f\left(X_1\right) \qquad (2.3)$$

Вибір нових X здійснюється за допомогою генеруючої функції

$$X_{i+1} = \psi\left(D, rand\right) \qquad (2.4)$$

Для деяких завдань оптимізації формування довільної вибірки дозволяє отримати хороші результати, так як такі завдання мають велику кількість задовільних рішень. Більшість практичних завдань не потрапляє в цю категорію. Застосування методу випадкового пошуку можливо в якості стохастичною складовою деяких більш складних методів глобальної

оптимізації. Наприклад, в алгоритмі рою частинок, де первинний розподіл часток в просторі рішень генерується випадковим чином по рівномірному закону розподілу.

Випадковий пошук зазвичай не використовує інформацію про попередні рішення. Тому для більш ефективного вирішення завдань, на кожній ітерації алгоритму можна враховувати якість попереднього рішення - **пошук з поверненням**. Це досягається наступним чином:

-в просторі оптимізуються параметрів робиться крок у випадковому напрямку

$$X_{i+1} = \psi\left(D, rand\right) \qquad (2.5)$$

Для вибору довжини кроку, в кожному конкретному випадку проводиться дослідження, при цьому ефективність алгоритму залежить від довжини кроку, що підвищує складність використання методу;

-отримане значення цільової функції порівнюється з попереднім, якщо в новому стані воно не краще, ніж на попередньому кроці, то система повертається в попередній стан;

-робиться новий крок у випадковому напрямку, якщо нове значення цільової функції краще за попереднє, тоді наступний крок робиться вже з нового стану.

$$X_{i+1} = \psi\left(D, X_i, f\left(X_i\right), rand\right) \qquad (2.6)$$

Ефективність цього методу низька, оскільки при попаданні в локальний екстремум довжина кроку може бути недостатньою для виходу з нього і пошуку глобального екстремуму.

Алгоритм пошуку з заборонами запропонований Ф. Гловером в 1989 році [76]. Запропонована ним схема пошуку екстремуму, дозволяє переміщатися між локальними екстремумами в пошуку глобального екстремуму, при цьому використовується список заборон, який забороняє відвідувати алгоритму частини околиць поточного рішення [77], щоб уникнути збіжність алгоритму в неефективному локальному екстремуму. Основним

механізмом, що дозволяє алгоритму вибиратися з локального оптимуму, є список заборон *Tabu(X_i).* Він будується по попередній історії пошуку, тобто за кількома попередніми рішеннями X_i, $X_{i-1}, \ldots, X_{i-m+1}$, і забороняє частина околиці поточного рішення $N(X_i)$, де i - це кількість попередніх рішень, яке враховується, а область. $N(X_i) \subset D.$ Точніша на кожному кроці алгоритму чергова точка X_{i-1} є оптимальним рішенням підзадачі.

Список заборон враховує особливості завдання. Одне з правил - це заборона використання тих рішень, які змінювалися на останніх n кроках алгоритму. Коли n дорівнює нулю, алгоритм зводиться до локального спуску.

В [76, 78] наведено множина різних варіантів реалізації пошуку з заборонами. Схема алгоритму пошуку з заборонами в загальному вигляді може бути представлена наступним чином [76].

1. Вибрати деяке початкове рішення X_0, обчислити його

$$f^{opt} = f(X_0), Tabu_1(X_0) := \text{ø}, \mathrm{K} := 0. \qquad (2.7)$$

2. Сформувати околицю поточного рішення $N_p(X)$, де кожен елемент околиці $K \in N(X)$ включається в мнжини $N_p(X)$ з ймовірністю p незалежно від інших елементів. Якщо околиця порожня $N_p(X) = \text{ø}$, то залишити поточне рішення. Використовуючи список заборон, знайти оптимальне рішення в околиці поточного.

$$f(X_{i+1}) = min\{f(K) \mid K \in N_P(X_i) \setminus Tabu_1(X_i)\} \quad (2.8)$$

3. Якщо нове рішення краще, ніж збережене найкраще рішення, то зберегти нове рішення як найкраще

$$f(X_{i+1}) < f^{opt} \text{ тоді } \quad f^{opt} := f(X_{i+1}) \qquad (2.9)$$

4. Якщо не виконано критерій зупинки, то очистити список заборон і перейти до пункту 2.

В алгоритмі використовуються керуючі параметри і, від яких залежить формування списку заборон і околиць. Вибір їх значень залежить від розмірності задачі і потужності околиці, тому необхідно адаптувати алгоритм до конкретної задачі оптимізації для отримання найкращого результату, а для

цього необхідно провести дослідження [76, 77, 78], які вимагатимуть значних витрат часу.

Даний метод успішно застосовується для вирішення різних важких завдань, наприклад завдань календарного планування [79, 80], але він вимагає ретельного налаштування і адаптації для вирішення завдань.

Для аналізу роботи енергосистем в сталих режимах використовують нелінійні системи алгебраїчних рівнянь, рівняння вузлових напруг. Поширеним підходом рішення оптимізаційної задачі КРП є метод приведеного градієнта.

Відшукання оптимуму градієнтним методом здійснюється рухом в напрямку, де значення функції буде найшвидшим способом спадати при знаходженні мінімуму. Рівняння пошуку оптимуму градієнтним методом записується

$$x_{k+1} = x_k + a_k grad\left(x_k\right) \qquad (2.10)$$

де a_k - крок пошуку.

Існує кілька варіантів градієнтного пошуку оптимуму. Всі вони залежать від вибору кроку. Якщо $a_k = const$, то метод називають рівномірним пошуком. Якщо a_k на кожній ітерації множити на довільне позитивне число $\delta < 1$ до виконання критерію зупину, то цей метод називають методом з дробленням кроку. При функціях «яружного типу» для прискорення збіжності роблять великий крок уздовж яру - метод прискореного градієнта.

Головним недоліком методу є те, що при багатокритеріальній функції, навіть при двох локальних оптимумах, знайти глобальний оптимум буде важко, тому що метод залежить від вибору початкового наближення, а також чутливий до похибок обчислень, особливо цей недолік проявляється в околиці точки оптимуму.

Визначення оптимуму функції на обмеженому просторі, на деякій множині, яке обмежене у вигляді нерівностей і рівностей нулю, виконують, застосовуючи метод штрафних функцій.

Якщо для функції $f(x)$ необхідно знайти мінімум при наступних обмеженнях

$$g_i(x_1, x_2, \ldots, x_n) \le 0, \quad i = 1, \ldots, m$$

то пошук мінімуму здійснюють для нової функції

$$\varphi(x) = f(x) + H(x) \qquad (2.11)$$

де $H(x)$ - це штрафна функція, яка визначається обмеженнями. Залежно від побудови штрафний функції, даний метод має кілька різновидів. Найчастіше використовують такий вигляд:

$$H(x) = \sum_{i=1}^{m} a_i(x_1, \ldots, x_n) g_i(x_1, \ldots x_n) \qquad (2.12)$$

$$\text{де } a_i(x_1, \ldots, x_n) = \begin{cases} 0, \textit{якщо} & g_i(x) - b_i \le 0, \\ r_i, \textit{якщо} & g_i(x) - b_i > 0, \end{cases}$$

$r_i > 0$ коефіцієнт штрафу, який іноді називають ваговим коефіцієнтом.

Вибирають крок обчислень і до отримання прийнятного рішення виробляють перехід від однієї точки до іншої, використовуючи штрафну функцію. Формула координат наступної точки виглядає наступним чином

$$x_j^{(k+1)} = \max\left\{0; x_j^{(k)} + h\left[\frac{df\left(X^{(k)}\right)}{dx_j} + \sum_{i=1}^{m} a_i \frac{dg_i\left(X^{(k)}\right)}{dx_j}\right]\right\}. \qquad (2.13)$$

Метод невизначених множників Лагранжа полягає в пошуку умовного екстремуму.

На практиці часто потрібно відшукання не просто мінімуму або максимуму будь-якої функції, а виникає більш складна задача, коли необхідно відшукати екстремум функції при деяких умовах, що обмежують область зміни аргументу. Прикладом може служити ізоперіметричне завдання, коли шукається тіло, що має максимальний обсяг за умови, що обмежуюча його поверхня має задану площу.

Нехай є функція $\omega = f(x, y \ldots)$ від n змінних $x, y \ldots$ заданих в області *D простору 0-х. Нехай крім того, на $x, y \ldots$ накладено ще m додаткових умов $(m < n)$:

$$\begin{cases} \phi_1(\mathrm{x}, \mathrm{y} \ldots) = 0 \\ \phi_2(\mathrm{x}, \mathrm{y} \ldots) = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \phi_m(\mathrm{x}, \mathrm{y} \ldots) = 0 \end{cases}. \qquad (2.14)$$

Рівняння (2.14) називають рівняннями зв'язку. Нехай $(x_0, y_0 \ldots)$ - внутрішня точка області D.

Прийнято [81], що функція $f(x, y \ldots)$ має в точці $(x_0, y_0 \ldots)$ умовний максимум (або відповідно умовний мінімум), якщо нерівність

$$f(x, y \ldots) \le f(x_0, y_0 \ldots)$$

або відповідно

$$f(x, y \ldots) \ge f(x_0, y_0 \ldots) \quad (2.15)$$

виконується в деякому колі цієї точки за умови, що $x, y \ldots,\ x_0, y_{0,} \ldots$ задовольняють рівнянням зв'язку (2.14).

Лагранж запропонував при знаходженні умовного екстремуму використовувати допоміжну функцію:

$$L(x, y, ..., \lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_m) = f(x, y...) - \sum_{i-1}^{m} \lambda_m \varphi_m(x, y...), \qquad (2.16)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda$ - невизначені множники Лагранжа.

Необхідною умовою екстремуму функції (2Л 6) є рівність нулю всіх приватних похідних. За правилами диференціювання воно має вигляд

$$\begin{cases} \dfrac{dL}{dx} = \dfrac{df(x, y, ...)}{dx} - \lambda_1 \dfrac{d\varphi(x, y, ...)}{dx} = 0 \\ \dfrac{dL}{dy} = \dfrac{df(x, y, ...)}{dy} - \lambda_2 \dfrac{d\varphi(x, y, ...)}{dy} = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{dL}{d\lambda_m} = -\varphi(x, y, ...) = 0 \end{cases} \qquad (2.17)$$

Вирішуючи систему рівнянь (2.17) отримуємо точки умовного екстремуму.

Область застосування методу Лагранжа обмежується невеликою розмірністю завдань і наступними вимогами:

- обов'язковим диференціюванням критерію оптимізації;

- видом обмежень, тобто вони не можуть бути задані у вигляді нерівностей. Крім того, застосування даного методу для багатопараметричних задач є досить складним внаслідок їх громіздкості.

2.3. Оптимізація реактивної потужності з використанням генетичного алгоритму

Вперше комп'ютерним моделюванням еволюційного відбору зайнявся Нільс Баричелла в 1954 році, проте визнання генетичного алгоритму (ГА) як методу вирішення оптимізаційних задач відбулося в 1960- 70 рр. в результаті робіт Інго Рехенберге і Джона Холланда [82]. Учні Д. Холланда Кеннет Де Йонг (Kenneth De Jong) з університету Джорджа Мейсона (Вірджинія) і Девід Голдберг (David E. Goldberg) з лабораторії ГА Іллінойсу розвинули його вчення і створили класичний ГА [83]. Саме алгоритм Голдберга і отримав назву «генетичний алгоритм». В даний час базові принципи ГА добре описані в багатьох книгах, таких як [84, 85].

Цей алгоритм поєднує елементи стохастичних і детермінантних підходів, основні принципи яких підглянуті в генетиці природного еволюційного відбору, вперше викладеного Ч. Дарвіном. Основна ідея алгоритму в тому, щоб створити і підтримувати популяцію хромосом, яка буде розвиватися протягом часу в процесі конкуренції. У зв'язку з цим генетичний алгоритм не можна віднести тільки до алгоритмів випадкового пошуку. Пошук рішення здійснюється шляхом одночасного аналізу декількох гілок еволюції, тобто під час пошуку рішення ефективно використовується інформація, накопичена в процесі еволюції. Причому, під час еволюції «виживають» тільки найкращі варіанти рішень, в той час як «погані» рішення «вимирають». Для визначення значущості кожного рішення використовується цільова (еволюційна) функція, що виконує роль навколишнього середовища при моделюванні еволюційного процесу, кінцевою метою якої є отримання оптимального рішення складної комбінаторної задачі. В описі методу використовуються спрощені біологічні терміни: популяція, хромосоми, гени, локус, аллель, мутація.

Хромосомою або особиною називають деякий рішення задачі, записане у вигляді вектора значень (генів). Сукупність рішень називають популяцією. Кожна особина в популяції оцінюється значенням цільової функції, розрахованої на основі значень з хромосоми. Отже, завдання необхідно представити таким чином, щоб її рішення можна було б записати у вигляді генотипу, тобто вектора значень. Наприклад, для пошуку мінімуму функції десяти аргументів $z(x_1, x_2, \ldots, x_{10})$ генотип буде складатися з десяти чисел (значень $x_1, x_2, \ldots, x_{10}$), а значення функції від цих чисел характеризує пристосованість генотипу, тому оптимізується функція так само називається функцією пристосованості або фітнес-функцією (fitness-function). Іншими словами, фітнес-функція - це міра робота генетичних алгоритмів зводиться до обробки популяції (безлічі) з *n* хромосом або особин. Кожна хромосома має свій особливий «фітнес», щоб визначити (вибрати) які хромосоми використовувати для створення нових хромосом в еволюційному процесі. Сукупність поспіль генів називають аллелью, а позицію гена в рядку (хромосомі) - локусом.

Генерація початкової популяції для вирішення завдання представляється у формі відповідної для застосування операторів генетичного алгоритму. Для цього проводять кодування вектора значень параметрів оптимізуючої системи у вигляді хромосоми. Спосіб кодування повинен повністю виключати виникнення недопустимих змін у результаті виконання операцій схрещування і мутацій.

Класичним способом є бінарне кодування. Існує декілька видів бінарного кодування. Найпростіший випадок, коли інформація, що зберігається в кожному гені, може бути представлена як логічна змінна, тобто хромосоми мають вигляд вектора

$$X = (x_1 \ldots x_i .. x_n),\ x_i = \{0,1\},\ i = 1,2 \ldots n$$

де *n* - кількість генів в хромосомі.

Основний недолік такого кодування полягає в тому, що сусідні числа відрізняються в значеннях кількох бітів, так, наприклад числа 7 і 8 в бітовому поданні розрізняються в 4-х позиціях, що значно збільшує розмір пошукового простору. У багатьох реалізаціях ГА замість звичайного двійкового представлення чисел використовують коди Грея. Їх особливістю є те, що будь-які два послідовних цілих числа, закодованих за допомогою коду Грея, відрізняються значенням лише одного біта. Існують також алгоритми, в яких спосіб кодування змінюється динамічно [86].

Д. Холланд показав, що існує зв'язок між ефективністю пошуку рішення і подобою хромосом в популяції. Тому він запропонував використовувати не кодовані хромосоми, а шаблони (вживається також поняття Шім'а [87]). Шаблон складається з трьох символів: {0, 1, *}.

Замість значка «*» може бути використаний 0 або 1, тому на підставі одного шаблону, може бути побудовано деякий підмноження дочірніх хромосом. Таким чином, Д. Холланд описує підмножина рішень в популяції зі збігом в певних позиціях. Основна ідея такого підходу - це з найменшим числом ітерацій знайти хромосоми із значенням цільової функції вище середнього і об'єднати їх для отримання нової хромосоми з найкращим значенням цільової функції. Наприклад, при вирішенні завдання пошуку максимуму функції знайти шаблони типу (11***) і (**111) тоді, застосовуючи оператор ГА кроссинговер до даних шаблонів, можна отримати хромосому (11111) з найкращим значенням цільової функції.

Для кількісної оцінки шаблонів в ГА використовують такі поняття, як порядок шаблону o(H) і довжина шаблону 5 (H).

Порядок шаблону - це число закріплених позицій (у двійковому алфавіті це число нулів і одиниць, представлених в шаблоні). Наприклад для шаблону H=(0**) порядок шаблону o(H)=1, а для шаблону H=(0*1) величина o(H)=2

Довжина шаблону - це відстань між першою і останньою позиціями нулів і одиниць. Наприклад, для шаблону $H=(011{*}{*}1{*})$, $\delta(H)=6-1=5$, а для шаблону $H=(0{*}{*}{*}{*}{*})$, $\delta(H)=1-1=0$.

Шаблони певної короткої довжини називають «будівельними блоками». Наприклад, в шаблоні $({*}{*}1{*})$ будівельним блоком буде елемент 1, в шаблоні $({*}{*}10)$ будівельним блоком буде 10. При реалізації ГА має виконуватися умова, щоб будівельні блоки розривалися тільки у виняткових випадках, зазначених користувачем.

Умовним параметром часу в ГА є номер покоління *t.* Нехай є деякий шаблон *H*, який присутній в популяції P^t. Якщо позначити *m(H, t)* число хромосом популяції P^t, які можуть бути отримані від шаблону *H*, тоді після отримання набору непересічних популяцій розміру N_p з переміщенням частини хромосом з популяції P^t в популяцію P^{t+1} передбачається отримати $m(H,t+1)$ представників шаблону H_B в генерації популяції P^{t+1}. Враховуючи, що *f(H)* - середнє значення цільової функції хромосом, представлених шаблоном *H* в генерації за формулою Д. Холланда можна записати вираз

$$m(H,t+1)=m(H,t)N_p f(H)/\sum_{i=1}^{L} f_i(x). \qquad (2.18)$$

Позначивши середнє значення цільової функції всієї популяції у вигляді

$$\bar{f}(x)=\sum_{i=1}^{N_p} f_i(x)/N_p \qquad (2.19)$$

рівність (2.18) можна записати

$$m(H,t+1)=m(H,t)\,f(H)/\,\bar{f}(x). \qquad (2.20)$$

Вираз (2.20) показує, що величина $m(H,t+1)$ змінюється як відношення середнього значення цільової функції шаблону до середнього значення цільової функції популяції. За правилом репродукції Д. Холланда в простому генетичному алгоритмі шаблон зі значенням цільової функції вище середнього копіюється в наступну генерацію, а шаблон з цільовою функцією нижче середнього - усувається. Якщо припустити, що цільова функція шаблону вище

цільової функції популяції на величину $c \cdot \bar{f}(x)$ де c=1,2,... - коефіцієнт, постійний протягом одного покоління, тоді

$$m(H,t+1) = m(H,t)(\bar{f}(x) + c \cdot \bar{f}(x)) / \bar{f}(x) = (1+c)m(H,t). \quad (2.21)$$

За умови, що генетичний алгоритм починає роботу з t=0 і, вважаючи c>0 константою, отримуємо вираз

$$m(H,t) = m(H,0)(1+c)^t, \quad (2.22)$$

який показує, що з плином часу кількість хромосом популяції, що мають значення цільової функції вище середнього, експоненціально зростає, а число «поганих» хромосом експоненціально зменшується.

Відома теорема шаблонів або фундаментальна теорема ГА [88] свідчить, що шаблони малого порядку, малої певної довжини і багатозначно цільової функції вище середньої формують зростаюче по показовому закону число своїх представників в наступних поколіннях генетичного алгоритму. Д. Голдберг в своїх дослідженнях [83] теореми шаблонів висуває гіпотезу будівельних блоків, яка полягає в тому, що «будівельні блоки об'єднуються, щоб сформувати кращі рядки». Іншими словами генетичний алгоритм прагнути досягти близького до оптимального результату за рахунок комбінування хороших блоків (зі значенням цільової функції вище середньої, малого порядку і певної довжини).

Вибір батьківських пар виконують після генерації початкової популяції індивідуумів (тобто початкового набору рішень задачі) потрібно змоделювати розмноження всередині цієї популяції. Для цього для кожної хромосоми визначається її придатність, тобто значення цільової функції, потім селективним способом за допомогою оператора репродукції визначаються батьківські пари. Таким чином, виходить проміжна популяція.

Нові хромосоми створюються за допомогою таких генетичних операторів, як оператор репродукції (селекції, відбору), кроссинговер (вживається також назва кросовер (crossover) або схрещування) і мутації (mutation).

Оператор репродукції (селекція) (ОР) - це процес, за допомогою якого хромосоми, які мають більш високе значення цільової функції, отримують

більшу можливість для відтворення нащадків. Для селекції хромосом використовують оператор репродукції на основі «розіграшу шляхом жеребкування». При реалізації оператора репродукції можна визначити ймовірність вибору кожної хромосоми $P_i(OP)$. Очікуване число копій і-ої хромосоми визначається виразом

$$N_i = P_i(OP) \cdot N_G, \qquad (2.24)$$

де N_G - число аналізованих хромосом.

Очікуване число копій можна також визначити за формулою

$$N_i = \frac{f_i(x)}{\bar{f}(x)}, \quad (2.25)$$

де $\bar{f}(x)$ - середнє значення цільової функції по всій популяції.

Роботу оператора репродукції на основі «розіграшу шляхом жеребкування» можна проілюструвати колесом рулетки. Для прикладу, візьмемо популяцію, що складається з чотирьох хромосом A_1, A_2, A_3, A_4. Для кожної хромосоми визначається значення цільової функції f_1, f_2, f_3, f_4. Розраховується сумарне значення цільової функції всіх хромосом в популяції. В даному випадку

$$sum\, f(x) = f_1 + f_2 + f_3 + f_4.$$

Далі визначається значення цільової функції кожної хромосоми в процентах, і ці значення відповідають полях колеса рулетки, представленого на рис. 2.1.

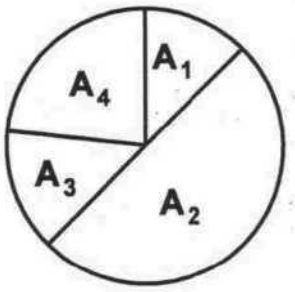


Рис. 2.1 - Колесо рулетки

Хромосоми для генерації вибираються шляхом обертання колеса рулетки. Колесо рулетки обертається, і після зупинки її покажчик визначає хромосому, обрану для реалізації наступного оператора. В даному прикладі колесо рулетки обертається 4 рази, тому що популяція складається з чотирьох хромосом. Значення 4 називають потужністю початкової популяції.

Існує методика - «стратегія елітизму», коли зберігається життя краще з індивідуумів поточного покоління. За аналогією з природою бувають ситуації, коли навіть саме пристосована істота може загинути в результаті якогось нещасного випадку, не залишивши потомства. Щоб уникнути подібних небажаних подій, необхідно гарантувати обов'язкове виживання краще члену популяції. Найбільш поширена процедура обов'язкового збереження тільки однієї кращої особини без її обробки за допомогою операторів вибору, кросинговеру або мутації.

Оператор кроссинговер дозволяє за певним правилом розділити інформацію хромосом батьків між хромосомами нащадків з метою отримання нових хромосом краще адаптованих до цільової функції. Існує величезна кількість операторів кроссиноговера: простий (одноточковий), двоточковий, багаточковий, упорядкований, циклічний, універсальний, тріадний, перетасувальний, «жадібний» і т.д. Покажемо основні оператори кросинговеру.

Простий (одноточковий) оператор кросинговеру перед початком роботи випадковим чином визначає точку розриву двох батьківських хромосом. Для наочності нехай одна батьківська хромосома має вид P_1:111111, а друга – P_2:000000.

Точка розриву 3, тобто розрив виконується після третього гена, тоді, змінюючи елементи після точки розриву між двома батьками, отримуємо два нових нащадка

$$P_1:111|111$$

$$P_2:000|000$$

$$P`_1:111|000$$

$$P`_2: 000 | 111.$$

Алгоритм одноточкового кросинговеру має три етапи:

1. З поточної популяції випадковим чином вибираються дві хромосоми $A = a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ і $B = b_1, b_2, b_3, \ldots, b_n$.

2. Випадковим чином вибирається точка оператора кросинговеру *k* (номер гена, після якого виконується розріз хромосоми) з чисел від 1 до *n-1*, де *n* - довжина хромосоми.

3. Формуються дві нові хромосоми

$$A` = a_1, a_2, a_3, \ldots, a_k,\ b_{k+1}, \ldots\ b_n$$

$$B` = b_1, b_2, b_3, \ldots, b_k,\ a_{k+1}, \ldots\ a_n$$

Двоточковий оператор кросинговеру в кожній хромосомі визначає дві точки розриву. Обмін в хромосомах виконується між точками розриву.

$$P_1 : 11 | 11 | 11$$

$$P_2 : 00 | 00 | 00$$

$$P`_1: 11 | 00 | 11$$

$$P`_2: 00 | 11 | 00 .$$

Багатоточковий оператор кросинговеру - це різновид двоточкового оператора, в якому виконується безліч точок розриву. Таким чином, хромосоми діляться на будівельні блоки. Перший нащадок утворюється з парних блоків першої хромосоми і непарних блоків другої хромосоми, а другий нащадок навпаки. Встановлено, що велика кількість точок розриву може привести до втрати «хороших» батьківських властивостей [85].

Універсальний оператор кросинговеру в даний час популярний для вирішення завдань з теорії розкладів. У ньому використовуються не дозволені точки, а так звана двійкова маска, довжина якої дорівнює довжині заданих хромосом. Перший нащадок виходить складанням першого батька з маскою за правилом:

$$0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 1 = 0$$

Другий нащадок виходить аналогічно.

P_1:111111

P_2:000000

011010- маска

$P`_1$:101101

$P`_2$:00010

Маска вибирається випадково з заданою вірогідністю або на основі генератора випадкових чисел. При цьому чергування 0 і 1 в масці відбувається з імовірністю приблизно 50%.

Оператор кроссинговер - це метод для розділення інформації батьків між хромосомами нащадків з метою отримання нових хромосом, краще адаптованих до цільової функції, ніж їхні батьки.

Оператор мутації дозволяє внести в дочірні хромосоми, отримані після кросинговеру, випадкові зміни для забезпечення мінливості популяції.

Як правило, оператор мутації складається з двох етапів:

1. У хромосомі $A = a_1, a_2, a_3, \ldots, a_{n-2}, a_{n-1}, a_n$ вибираються випадковим чином дві позиції генів, наприклад, a_3 та a_{n-1}.

2. Гени, обраних позицій переставляються і виходить нова хромосома $A`=a_1, a_2, a_{n-1}, \ldots, a_{n-2}, a_3, a_n$.

Як і оператор кросинговеру, оператор мутації має кілька видів: одноточковий, двоточковий, многоточечний, будівельні блоки і т.д. Розглянемо основні оператори мутації.

Одноточковий оператор мутації - це найпростіший оператор мутації. При його реалізації випадковим чином вибирається ген в батьківській хромосомі і обмінюється на поруч стоїть ген. Наприклад, маємо батьківську хромосому

P:110111

точка оператора мутації

P:110|111

P`:111|011.

Двоточковий оператор мутації випадковим або спрямованим чином вибирає дві точки розриву. Потім проводиться перестановка генів, розташованих праворуч від точок розриву.

Наприклад:

P: A | B C D | E F,

P`: A E C D B F.

Розвитком двоточкового оператора мутації є багатоточковий оператор мутації. В цьому випадку відбувається обмін генів, розташованих правіше точок розриву між собою в порядку їх розташування. Ген, розташований правіше останньої точки розрізу, переходить на місце першого. наприклад:

P: A | B C D | E F | G H,

P`: A G C D B F E H.

Оператор мутації довільно змінює одну або більше компонентів обраної структури так, щоб збільшити структурну мінливість популяції.

В ГА існують і інші додаткові оператори такі як: інверсії, транслокації, транспозиції, сегрегації, видалення, вставки, редукції, рекомбінації [85]. Дані оператори, як правило, використовуються для комбінаторних задач. Оскільки автор при реалізації ГА не користувався цими операторами, то вони в даній роботі не розглянуто.

Критерії зупинки генетичного алгоритму (умовою закінчення) еволюційного пошуку, як показано в роботах [89, 90] може служити одна з наступних умов:

1) досягнення певного (заданого) числа поколінь або певного часу розрахунку;

2) досягнення заздалегідь відомого бажаного значення функції пристосованості;

3) всі індивідууми в популяції збігаються між собою і знаходяться в області деякого екстремуму - сходження (convergence) популяції. Популяція вичерпала свій життєвий цикл, тому що необхідною умовою еволюції популяції на генетичному рівні є наявність мінливості хромосомного набору від

покоління до покоління. У такій ситуації кроссинговер практично ніяк не змінює популяції, тому що створювані нащадки є копіями батьків з зміненими ділянками хромосом. В цьому випадку для формування критерію зупинки часто використовується інформацію про пристосованості індивідуумів популяції. Наприклад, виконання нерівності (2.26) означає закінчення еволюційного процесу.

$$\frac{\bar{f(x)}}{f(x)_{\max}} \geq \delta, \qquad (2.26)$$

де δ - величина, що характеризує збіжність процесу, близька до 1;

4) в роботі [91] запропоновано в якості умови зупинки ГА додатково до незмінності середньої пристосованості популяції використовувати також і метрику, що оцінює відмінність особин в популяції.

Схема простого генетичного алгоритму відповідно до [82, 85] для більшої наочності може бути представлена у вигляді блок схеми, показаної на рис. 2.2.

Якщо позначити популяцію *i*-го покоління як $\{X_j(i)\}$):

1. Вибирається початкова популяція$\{X_j(0)\}$. За відсутності апріорної інформації, вона вибирається випадковим чином.

2. Обчислюється пристосованість $f(X_j)$ и кожної особини X_j популяції $\{X_i(i)\}$.

3. За допомогою одного з алгоритмів селекції з $\{X_j(i)\}$ вибирається деяка кількість хромосом відповідно до їх пристосованості $f(X_j)$, і з них будується проміжна популяція.

4. З проміжної популяції вибираються пари хромосом, і до них застосовується оператор кросинговер.

5. До хромосомам проміжної популяції застосовується оператор мутації.

6. Отримані на кроках 4, 5 хромосоми утворюють нову популяцію $\{X_j(i+1)\}$.

7. Перевіряється умова зупинки. Якщо воно не виконано, то здійснюється перехід до кроку 2.

8. Кінець алгоритму.

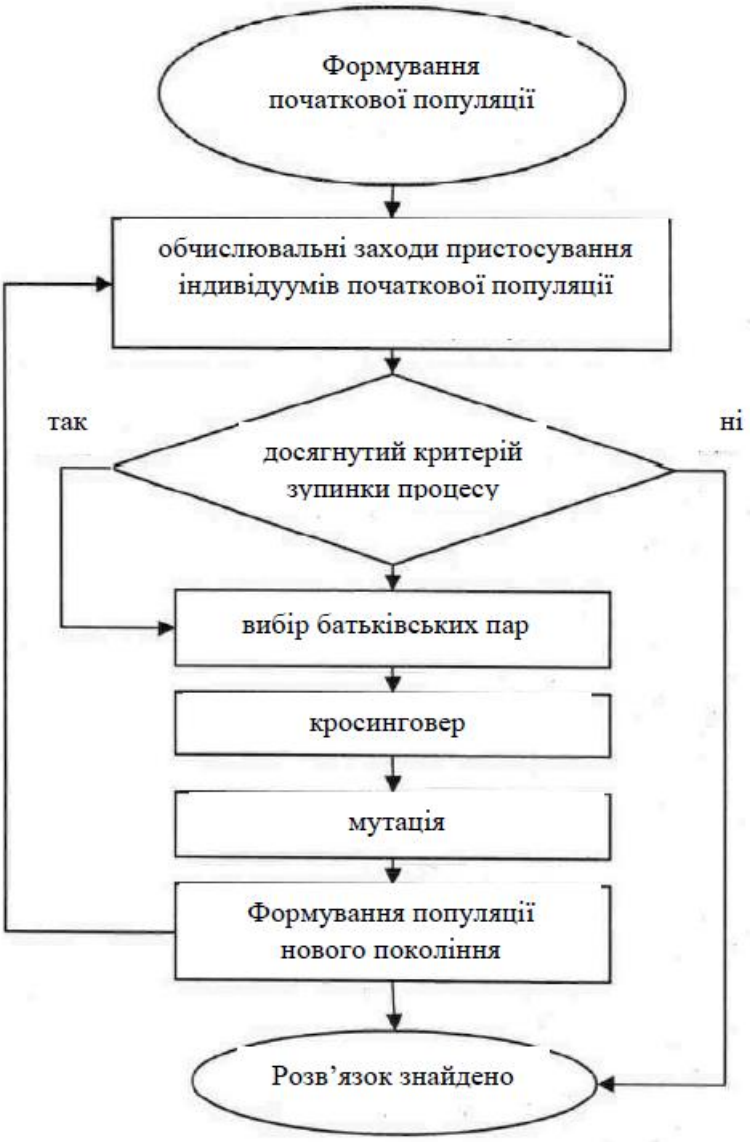


Рис. 2.2 - Блок-схема простого генетичного алгоритму

Сукупність кроків алгоритму, під час яких породжуються нові хромосоми (кроки 4, 5, 6) звуться рекомбінації.

Генетичні алгоритми дозволяють при їх використанні для вирішення інженерних завдань:

- зменшити обсяг і час обчислень;

- отримати оптимальне або близьке до оптимального рішення даної задачі;

- скоротити число помилок моделювання.

Вони є потужною стратегією виходу з локальних оптимумів, оскільки стратегія генетичних алгоритмів полягає в паралельній обробці безлічі альтернативних рішень. З іншого боку, генетичні алгоритми засновані на механізмах селекції і генетики, а це вимагає створення на кожному кроці нових популяцій шляхом відбору і схрещування генів попередньої популяції, тому потрібна велика кількість обчислень цільової функції для низькоефективних рішень. Наслідком цього є тривалий час роботи, оскільки «операції перетину і мутації зазвичай не використовують структури даних, специфічних для даного завдання, внаслідок чого більшість переходів дає низькоякісні рішення і процес пошуку найкращого рішення протікає повільно» [73].

2.4. Порівняльний аналіз оптимізації з використанням методів Лагранжа і генетичного алгоритму

Порівняння методів здійснено для вирішення завдання КРП в схемі електропостачання машинобудівного підприємства, при цьому в схемі не враховуються споживачі основного технологічного процесу, де компенсація реактивної потужності вже виконана.

Принципова електрична схема електропостачання і схема заміщення наведені на рис. 2.3 і 2.4 відповідно.

Розрахунок усталеного режиму проводився в програмі для розрахунку потокорозподілу network. У додатку А в таблицях А.1, А.2, А.3 наведені значення параметрів, що вводяться схеми по вузлах, гілкам і трансформаторів відповідно. Результати розрахунку по вузлах наведені в таблиці А.4, по гілках - в таблиці А.5.

Коефіцієнт реактивної потужності на межі балансової належності. $tg\varphi = 0{,}52$. Завдання КРП вирішувалася до значення коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi = 0{,}15$.

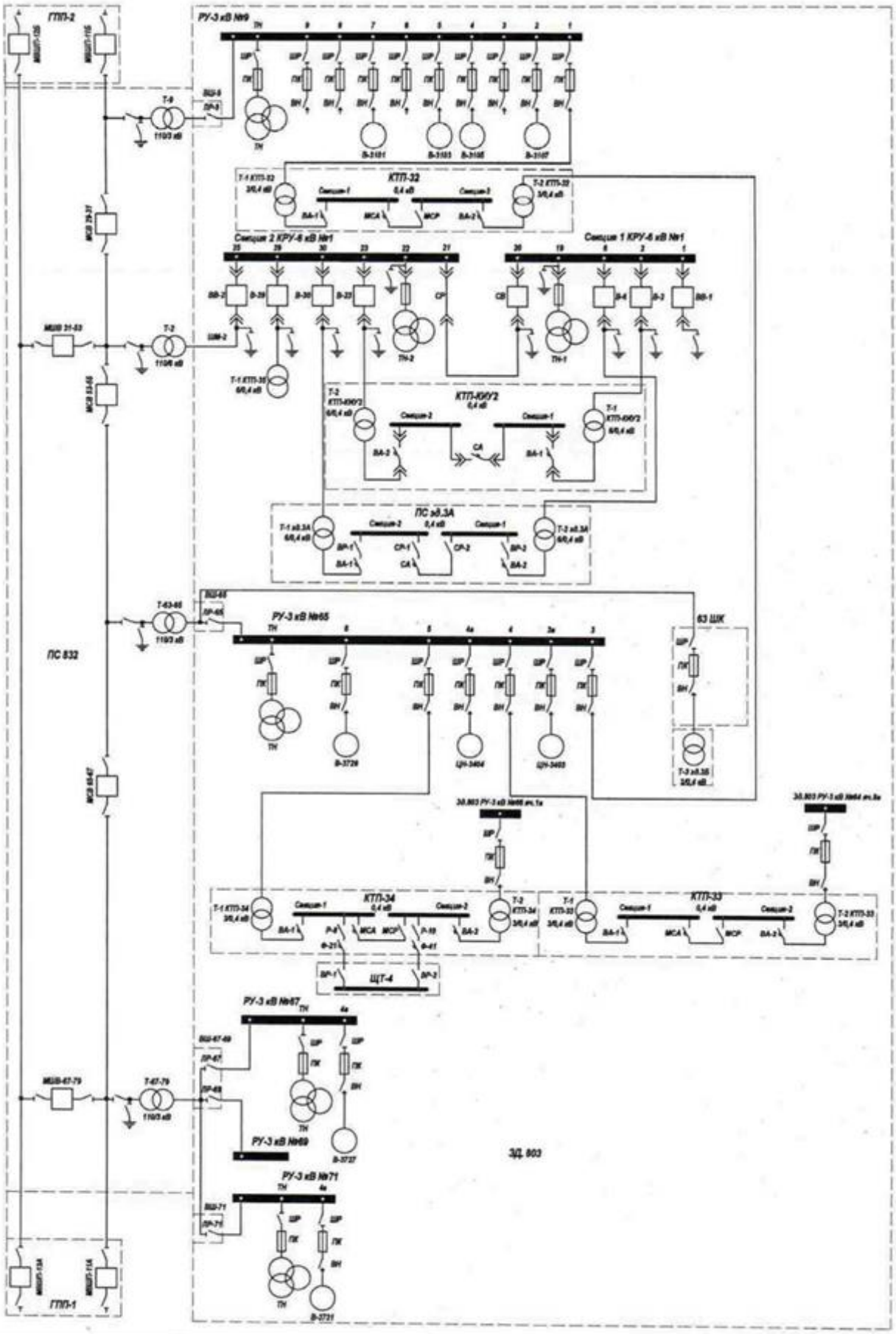


Рис. 2.3 Принципова електрична схема електропостачання підприємства

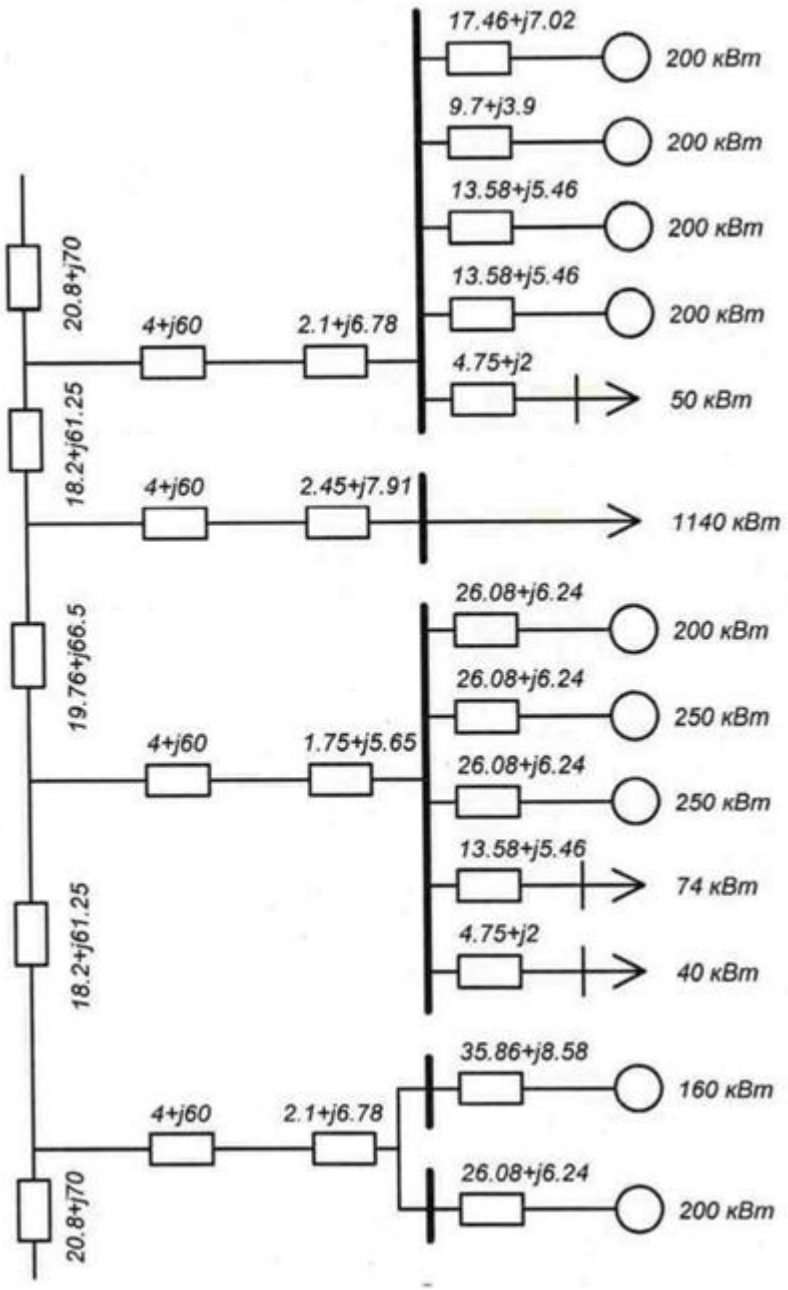


Рис. 2.4 - Схема заміщення електропостачання цеху

2.4.1. Розрахунок методом невизначених множників Лагранжа

Стандартна постановка задачі оптимального розподілу потоків реактивної потужності в енергосистемі полягає в мінімізації сумарних втрат електричної енергії в мережі. Вводиться припущення, що генерація реактивної потужності не пов'язана з якими-небудь витратами. Тоді єдиною метою оптимізації може бути зниження втрат електроенергії. Вважаємо, що електропостачання

здійснюється від шин нескінченної потужності. Математичне формулювання завдання зводиться до наступного:

цільова функція

$$F = \Delta W_{\Sigma}(Q_k) \to \min \qquad (2.27)$$

- обмеження по балансу реактивної потужності в енергосистемі

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{\Gamma i} + \sum_{i=1}^{l} Q_{C i} - \sum_{i=1}^{m} Q_{H i} - \Delta Q_{\Sigma} = 0, \qquad (2.28)$$

- межі по генерації реактивної потужності компенсують пристроями

$$Q_{K\min} \le Q_K \le Q_{K\max} \qquad (2.29)$$

- межі $tg\varphi$ на межі балансової належності

$$0 \le tg\varphi \le 0{,}15, \qquad (2.30)$$

де Q_H - реактивна потужність в навантажувальних вузлах мережі;

Q_Γ - реактивна потужність в генераторних вузлах мережі;

ΔW_Σ - сумарні втрати електричної енергії в мережі від передачі реактивної потужності;

ΔQ_Σ - сумарні втрати реактивної потужності в мережі;

Q_K - потужність встановлених компенсуючи пристроїв. Обмеження (2.28 - 2.30) визначають допустиму область, в межах якої повинен бути знайдений оптимальний режим.

Оптимальний розподіл Q без урахування технічних обмежень можна здійснити за методом Лагранжа. Замість цільової функції (2.27) переходять до пошуку умовного екстремуму функції Лагранжа:

$$F = \Delta W_{\Sigma} + \lambda\left(\sum_{i=1}^{n} Q_{\Gamma i} - \sum_{i=1}^{m} Q_{H i} - \Delta Q_{\Sigma}\right) \to \min. \qquad (2.31)$$

Прирівнявши нулю, приватні похідні за критерієм оптимізації (2.31) по всім змінним і λ отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial F}{\partial Q_{\Gamma_1}} = \frac{\partial \Delta W_{\Sigma}}{\partial Q_{\Gamma_1}} + \lambda\left(1 - \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q_{\Gamma_1}}\right) = 0, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\frac{\partial F}{\partial Q_{\Gamma_n}} = \frac{\partial \Delta W_{\Sigma}}{\partial Q_{\Gamma_n}} + \lambda\left(1 - \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q_{\Gamma_n}}\right) = 0 \end{aligned} \qquad (2.32)$$

Рівняння 2.32 дають можливість визначити реактивні потужності всіх джерел, що відповідають мінімуму втрат електроенергії в мережі. Після нескладних перетворень можна отримати критерій оптимальності рішення:

$$\frac{\partial \Delta W_{\Sigma}}{\partial Q_{\Gamma_1}} = \frac{\partial \Delta W_{\Sigma}}{\partial Q_{\Gamma_2}} = \frac{\partial \Delta W_{\Sigma}}{\partial Q_{\Gamma_n}} \qquad (2.33)$$

При вирішенні оптимізаційних задач методом Лагранжа слід враховувати одну з основних особливостей методу - це неможливість враховувати обмеження у вигляді нерівностей (2.29, 2.30), що є істотним недоліком підходу, різко скорочують область його застосування.

Цільова функція:

$$\Delta W\left(Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}, Q_{k4}, Q_{k5}\right) =$$

$$= 3T10^{-3}\left[\begin{array}{l} \frac{\left(Q_1 - Q_{k1}\right)^2}{U^2} R_1 + \frac{\left(Q_2 - Q_{k2}\right)^2}{U^2} R_2 + \\ \frac{\left(Q_3 - Q_{k3}\right)^2}{U^2} R_3 + \frac{\left(Q_4 - Q_{k4}\right)^2}{U^2} R_4 + \frac{\left(Q_5 - Q_{k5}\right)^2}{U^2} R_5 \end{array}\right].$$

Для однозмінного виробництва прийнято Т = 4000 годин. Для переходу від обмежень у вигляді нерівностей, вводимо обмеження по максимальній потужності компенсуючих пристроїв

$$\Sigma Q_{k1} = 1,6 MBAp,$$

$$\gamma(Q_{k1,} Q_{k2,} Q_{k3,} Q_{k4,} Q_{k5}) = 1,6 \qquad (2.35)$$

де $\gamma(Q_{k1,} Q_{k2,} Q_{k3,} Q_{k4,} Q_{k5})$ - допоміжна функція.

Цільова функція з урахуванням обмеження:

$$F(Q_{k1,} Q_{k2,} Q_{k3,} Q_{k4,} Q_{k5}, \lambda) = \Delta W(Q_{k1,} Q_{k2,} Q_{k3,} Q_{k4,} Q_{k5}) + \\ + \lambda\gamma(Q_{k1,} Q_{k2,} Q_{k3,} Q_{k4,} Q_{k5}) \qquad (2.36)$$

Беруться похідні від цільової функції по всім змінним, і вирішується система рівнянь.

Вирішуючи задачу методом Лагранжа, отримані наступні потужності компенсуючих пристроїв, які необхідно встановити для підтримки $tg\varphi$ в межах, обумовлених договором:

$$Q_{k1} = 412 кВАр;$$

$$Q_{k2} = 618\ кВАр;$$

$$Q_{k3} = 397\ кВАр;$$

$$Q_{k4} = 81\ кВАр,$$

2.4.2. Розрахунок генетичним алгоритмом

Завдання визначення точок установки компенсуючих пристроїв і їх потужностей в цій же схемі була вирішена із застосуванням генетичного алгоритму. Це завдання можна реалізувати в середовищі MatLaЬ.

Блок-схема генетичного алгоритму для вирішення завдання наведена на рис. 2.5.

Задаються вихідні дані:

m - кількість гілок;

n - кількість вузлів;

к - кількість рішень.

Потужність компенсуючих пристроїв генерується випадковим чином з інтервалу від 0 до потужності того вузла, де передбачається установка даного компенсуючого пристрою.

У матриці Q_{ki} стовпці - це вузли схеми, а рядки - це рішення. Життєвий цикл популяції реалізований у вигляді набору генетичних операторів:

- вибір батьківської пари за допомогою оператора «турнір»;

- схрещування обраних хромосом з імовірністю P_{cr} виконується роздільне, тому що змінні мають комбінований характер, двоточковим кросовером;

- мутація одного випадково обраного гена в кожній хромосомі із заданою вірогідністю P_{mut}. Значення даного гена приймає нове значення випадковим чином вбрання з допустимого діапазону його зміни. Для джерел реактивної потужності межі визначаються виразом (2.29), а для місць установки існує максимальна межа, відповідний загальної кількості вузлів схеми;

розрахунок цільової функції для хромосом нової популяції наступного покоління за допомогою відбору хромосом з мінімальним значенням цільової функції.

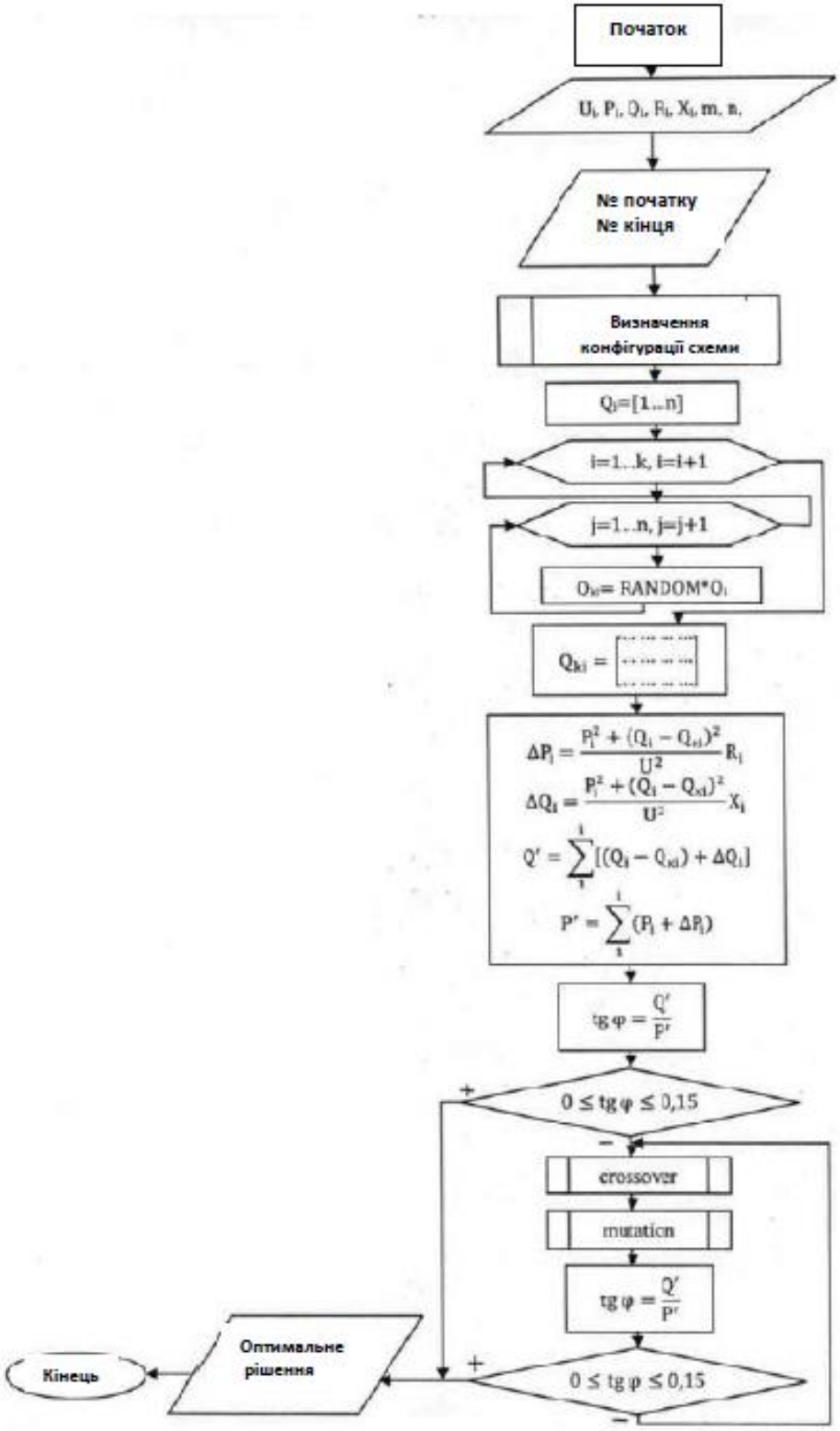


Рис. 2.5 - Блок-схема рішення задачі КРП

На рис. 2.6. представлене вікно утиліти Genetic Algorithm Tool пакету MATLAB.

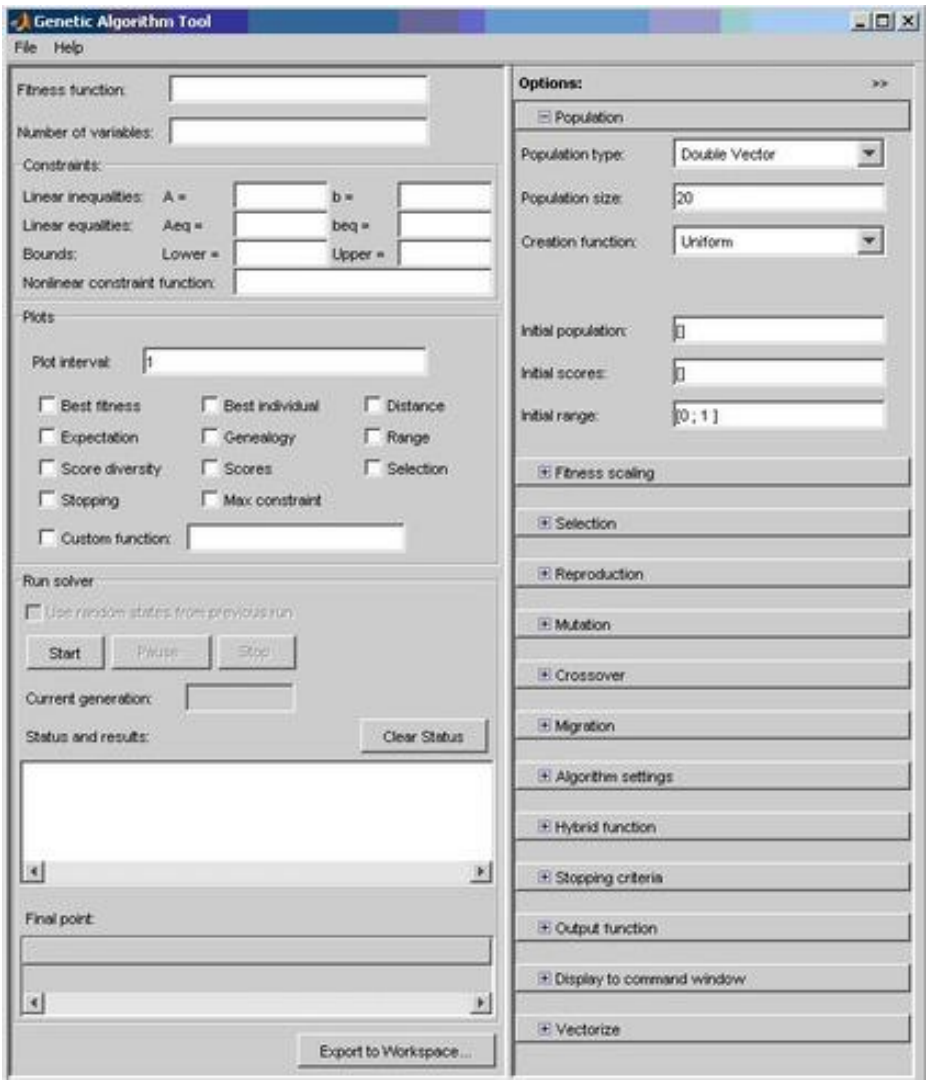


Рис. 2.6. Основне вікно утиліти Genetic Algorithm Tool пакету MATLAB

Рішення зведені в таблицю 2.1

Таблиця 2.1 - Результати рішення методом генетичного алгоритму

Номер вузла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Потужність компенсувального пристрою, МВАр	0	0	0,062	0,055	0	0,597	0	0,301	0	0,315

2.4.3. Аналіз отриманих рішень

Область застосування традиційного використання методу Лагранжа обмежується вимогою обов'язкової диференційованості критерію оптимізації, видом обмежень, наявністю хорошого початкового наближення.

Застосування еволюційних методів, зокрема генетичних алгоритмів, дозволяє уникнути встановлення ряду припущень і спрощень без значного ускладнення обчислювальної процедури. Слід зазначити, що ГА не чутливий до форми кривої критерію оптимізації (наприклад, зі стрибками або розривами), оскільки не виробляє його диференціювання. Це дає можливість обійтися без додаткових перетворень витратних характеристик.

Для порівняння результати, отримані методом Лагранжа і методом ГА, зведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати рішення методом Лагранжа і ГА

Q_{ki}	Потужність компенсуючи пристроїв, розрахованих методом Лагранжа, кВАр	Потужність компенсуючи пристроїв, розрахована ГА, кВАр	Різниця потужностей, отримання від реалізації двох методів, кВАр
Q_{k1}	412	315	103
Q_{k2}	618	597	26
Q_{k3}	397	301	105
Q_{k4}	81	62	22
Q_{k5}	86	55	41
Сума	1594	1330	264

З табл. 2.2. видно, що для досягнення необхідного коефіцієнта реактивної потужності за методом Лагранжа необхідно встановити 1594 кВАр в п'яти вузлах системи електропостачання, а за допомогою генетичного алгоритму та ж мета досягається установкою 1330 кВАр. Економія становить 264 кВ Ар, тобто 16,6%. Крім того, проведений порівняльний аналіз показує, що по даному алгоритму забезпечуються мінімальні витрати на компенсацію реактивної

потужності необхідні для дотримання умов з енергомежевою компанією. При цьому завдяки цьому алгоритму компенсується саме стільки реактивної потужності, скільки необхідно для дотримання договору, а не значно більше, як при спрощеному розрахунку [92, 93]. Поряд з цим, аналіз швидкодії алгоритмів показує, що зі збільшенням кількості вузлів ресурс витрачання часу традиційного методу нелінійного програмування зростає нелінійно істотно швидше, ніж при генетичному алгоритмі.

Висновки до розділу 2

1. Завдання компенсації реактивної потужності в електроенергетичних системах і в системах електропостачання мають багатовимірний і мультимодальний характер. Для вирішення подібного роду завдань доцільно використання еволюційних алгоритмів.

2. Застосування еволюційних алгоритмів для вирішення задач компенсації реактивної потужності дозволяє використовувати реальні експлуатаційні дані, і забезпечує отримання більш точних рішень, що дозволяє економити фінансові витрати.

3. Порівняльний аналіз методів ГА і Лагранжа в умовах обмежень представлених у формі рівності показав такі переваги ГА:

- не потрібно використовувати точний аналітичний вираз для цільової функції і безперервності її змінних;

- не потрібно обчислювати похідні для визначення невизначених множників Лагранжа;

- алгоритми працює швидше за рахунок меншої трудомісткості обчислювальної процедури.

4. Метод оптимізації на основі ГА дозволяє вирішувати задачі оптимізації в змінах динамічних умовах.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ СТУПЕНЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ БЕЗПОСЕРЕДНЬО У СПОЖИВАЧІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Постановка завдання дослідження

Найважливішою ланкою в системах електропостачання промислових підприємств є лінії електропередачі напругою до 10 кВ. Велика розгалуженість і протяжність мереж низької напруги характеризується досить високими втратами електроенергії, що значно знижує показники енергоефективності мереж електропостачання та підприємства в цілому [94, 95]. Аналогічна ситуація спостерігається і в системах електропостачання міст, які мають велику кількість вузлів напругою 10 - 0,4 кВ. Розгалуженість цих мереж формується мільйонами точок електроприймачів. Над ними тяжіє, так зване «прокляття розмірності», яке характеризує складне вирішення їх режимних завдань і підтримку якості електричної енергії.

В роботі виконано аналіз системи електропостачання електроспоживачів промислового підприємства на напрузі 0,4 кВ та міської електричної мережі на напрузі 10 кВ.

На промислових підприємствах розглянуті питання електропостачання споживачів, які забезпечують кліматичні і температурні умови основних технологічних пристроїв (споживачі власного витрати).

Характерною рисою цих підприємств є комплекс жорстких формальних вимог до електропостачання наступних систем:

- підкачуючих компресорів основний технології;
- водяного охолодження технологічного обладнання;
- вентиляція.

Для приводу механізмів цих систем використовуються асинхронні електродвигуни. Електропостачання електродвигунів здійснюється кабельними лініями від підстанцій власних витрат (ПВВ). Територіальне розташування підкачуючих компресорів, водяного охолодження технологічних установок, систем вентиляції залежить безпосередньо від розташування основного

технологічного устаткування, тому оптимізувати конфігурацію системи електропостачання, як це запропоновано в роботах [96, 97], не є можливим. Ця обставина обумовлює високу протяжність кабельних ліній електропередачі всередині цехів підприємств і становить від 50 м до 400 м.

Аналіз споживачів міських електричних мереж показує, що широке використання в комунально-побутовому секторі нових різних типів електроприймачів (пральних машин, мікрохвильових печей, морозильних камер, посудомийних машин, кондиціонерів і т.п.) призвело до значного збільшення споживання реактивної потужності, що обумовило зростання технологічних витрат електроенергії при її транспортуванні.

В даний час рівень компенсації реактивної потужності обумовлюється максимальним коефіцієнтом реактивної потужності [68] і для мереж нижче 1 кВ Мінпаливенерго рекомендований 0,35, а для мереж 10 кВ - 0,4, в той час як реальні значення коефіцієнтів реактивної потужності, становлять від 0,5 до 0,7 [69]. Крім того, в науковій літературі не наведено аргументованого обґрунтування встановлених в [68] максимальних значень коефіцієнтів реактивної потужності, оскільки для цього необхідно вирішувати задачу оптимізації, яка з математичної точки зору є багатокритеріальною і вимагає досліджень ступеню (глибини) компенсації реактивної потужності у електроспоживачів. Це обумовлено тим, що зі збільшенням ступеню компенсації КРМ знижуються струмові навантаження на живлячі лінії електропередачі (кабелі) і в квадратичній ступені втрати активної потужності. Очевидно, що КРМ дозволить знизити втрати електроенергії на стадіях: виробництва, передачі, споживання, і покращити рівень напруги в вузлах мережі.

Цей розділ присвячений дослідженню впливу ступеню компенсації реактивної потужності на енергоефективність промислових підприємств і міських електричній мережі, зокрема, на зниження втрат електроенергії з урахуванням мінімізації витрат на КУ.

3.2. Основні споживачі реактивної потужності промислових підприємств

Аналіз складу електроприймачів промислових підприємствах і результати вимірювань споживання активної та реактивної потужностей в години максимуму навантаження найбільш завантаженого зимового дня [98] представлений в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Склад електроприймачів в системі електропостачання підприємства

Види електроприймачів	Встановлена потужність електроприймачів, %	
	активна потужність	реактивна потужність
Асинхронні електродвигуни	30	33
Синхронні електродвигуни	23	0
Вентиль ніперетворювачі	18	10
Електропічні установки	12	8
Побутові електроприлади	7	5
Власні потреби підстанцій підприємства	5	2

З табл. 3.1 видно, що основними споживачами реактивної потужності на промислових підприємствах є асинхронні двигуни (АД). В [99] показано, що на частку АД в промисловості припадає близько 90% всього парку електродвигунів. Розглядаючи мережі 0,4 кВ, варто відзначити, що в машинобудуванні на асинхронні двигуни припадає 52% споживання електричної енергії [100]. Коефіцієнт $cos\varphi$ АД при номінальному режимі роботи в залежності від потужності і конструкції машини становить від 0,7 до 0,91 ($tg\varphi$ від 1,02 до 0,46) - це означає, що від 10% до 30% всієї споживаної потужності двигуна становить реактивна потужність. У паспортних даних заводів-виготовлювачів і в існуючих довідниках на електричні машини приводиться коефіцієнт потужності ($cos\varphi$).

Передача реактивної потужності в системі електропостачання призводить до негативних наслідків, які представлені у вигляді блок-схеми [101] на рис. 3.1.

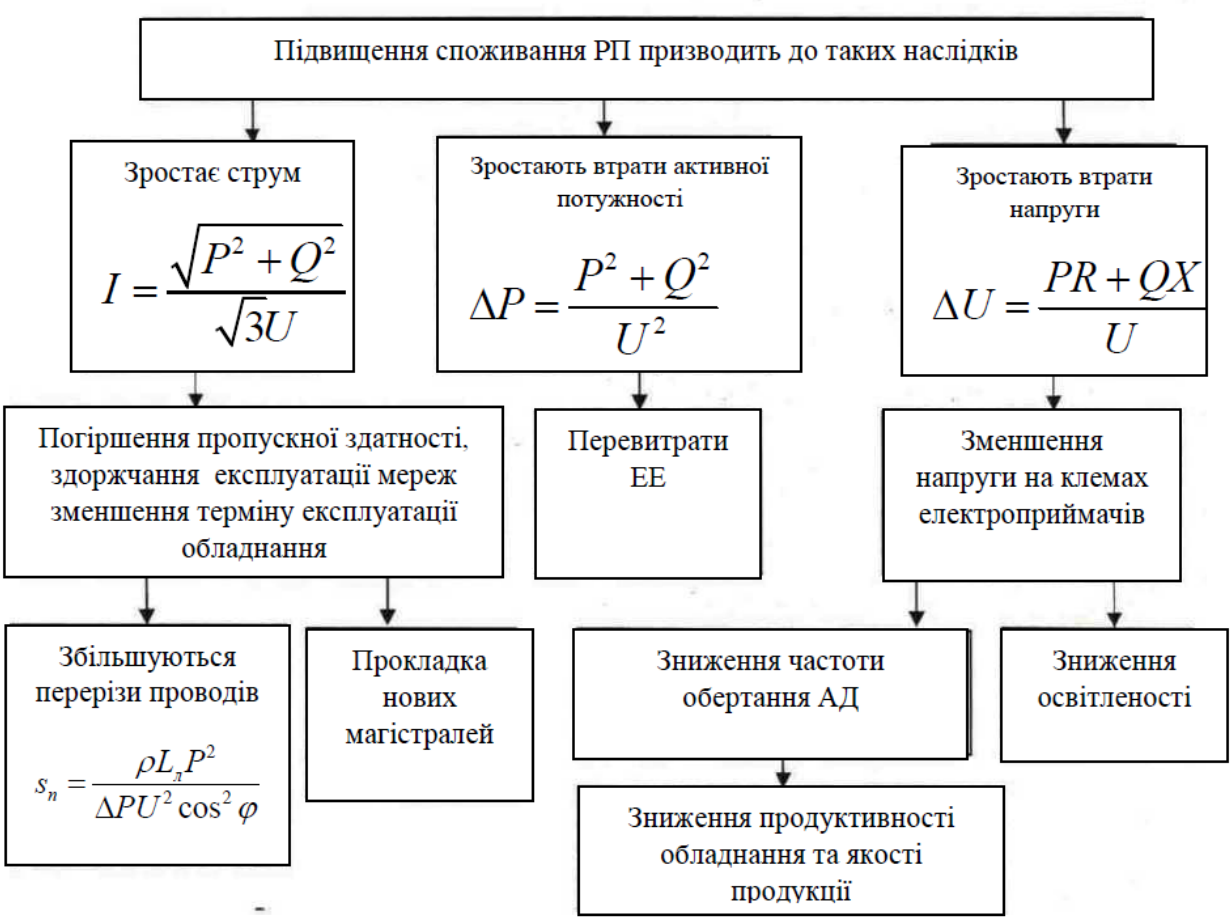


Рис. 3.1 - Блок-схема негативних наслідків від підвищеного споживання реактивної потужності у блок-схемі рис. 3.1 прийняті наступні позначення:

P - активна потужність, кВт; Q - реактивна потужність, кВАр; $L_Л$ - довжина ліній електропередачі, м; ρ - питомий опір провідника, Ом/м; R та X - активний і реактивний опір лінії електропередачі, Ом; $S_Л$ - переріз проводу, мм^2.

Негативні наслідки передачі реактивної потужності можна зменшити наступним чином:

- використання сучасних енергозберігаючих технологічних установок і енергозберігаючої електротехнічної продукції;

- розробкою інтелектуальних мереж (SmartGrid) і комплексів електроустаткування (повітряних ліній передачі, трансформаторів, вимикачів і

т.д.), з використанням нових принципів, технологій передачі та управління процесом [102];

- зменшенням трас прокладки ліній електропередач, тобто раціональною конфігурацією систем електропостачання [96, 97];

- зниженням споживання реактивної енергії від генераторів за допомогою установки джерел реактивної потужності у споживача.

З усього перерахований заходів, лише установка джерел реактивної потужності у електроспоживачів з фінансової точки зору є найбільш прийнятним заходом. Всі інші заходи можуть бути реалізовані або тільки на стадії проектування, або вимагають великих фінансових витрат. З огляду на економічні та фінансові проблеми, що склалися в даний час на промислових підприємствах, показані в підрозділі 1.2 цієї роботи, підвищити показники енергоефективності на підприємствах і в міських електричних мережах можливо шляхом зменшення втрат при передачі і розподілі електроенергії в розподільних мережах за рахунок компенсації реактивної потужності у споживачів

$$\Delta P = \frac{P^2 + \left(Q - Q_{КУ}\right)^2}{U^2} \cdot R. \qquad (3.1)$$

Одночасно це дозволить поліпшити один з показників якості електричної енергії - гранично допустиме значення відхилення напруги від номінального в вузлах мережі електропостачання

$$\Delta U = \frac{PR + \left(Q - Q_{КУ}\right)X}{U}. \qquad (3.2)$$

Особливо це має велике значення в вузлах системи електропостачання, до яких підключені АД, оскільки для мереж низької напруги характерні короткочасні провали напруги, обумовлені пуском АД, короткими замиканнями і збуреннями в живильної електричної мережі. У мережі промислових підприємств ліквідація збурень засобами релейного захисту та відновлення нормального режиму роботи не завжди забезпечує динамічну

стійкість електричних машин. При зниженні напруги нижче критичного у вузлах навантаження відбувається перекидання АД.

При вирішенні задачі КРМ, необхідно визначити вид джерел реактивної потужності. В даний час в якості джерел реактивної потужності для мереж до 1000 В найчастіше використовуються батареї статичних конденсаторів[2, 103, 104, 105]. Також в літературі [2, 105] в якості рекомендацій пропонується замінювати зношені асинхронні електродвигуни на синхронні. Однак, вказана пропозиція не є однозначною, оскільки генерація реактивної потужності СД пов’язана з додатковими втратами електричної енергії. Крім того, СД мають значно більшу вартість і складність в порівнянні з АД. При подальшій експлуатації СД витрати на їх поточні і капітальні ремонти в кілька разів вище аналогічних витрат у АД. В табл. 3.2. представлені результати порівняння витрати на ремонти асинхронного і синхронного двигунів однакової потужності і номінальної напруги. Тому було прийнято рішення в роботі в якості джерел реактивної потужності розглядати батареї статичних конденсаторів, іменовані далі як конденсаторні установки (КУ).

Таблиця 3.2 - Витрати на ремонти електродвигунів

Найменування обладнання	Види ремонтів	
	Витрати на поточний ремонт, тис. грн.	Витрати на капітальний ремонт, тис. грн.
Асинхронні електродвигуни	10,5	49,3
Синхронні електродвигуни	29,3	88,6

3.3. Схема електропостачання промислового підприємства № 1

Для вирішення завдання глибокої компенсації реактивної потужності була обрана одна з підстанцій власних витрати (ПВВ) машинобудівного підприємства № 1. Підстанція власних витрати складається з двох секцій (щитів власних потреб - ЩВП), об'єднаних між собою двома секційними рубильниками і секційним автоматом.

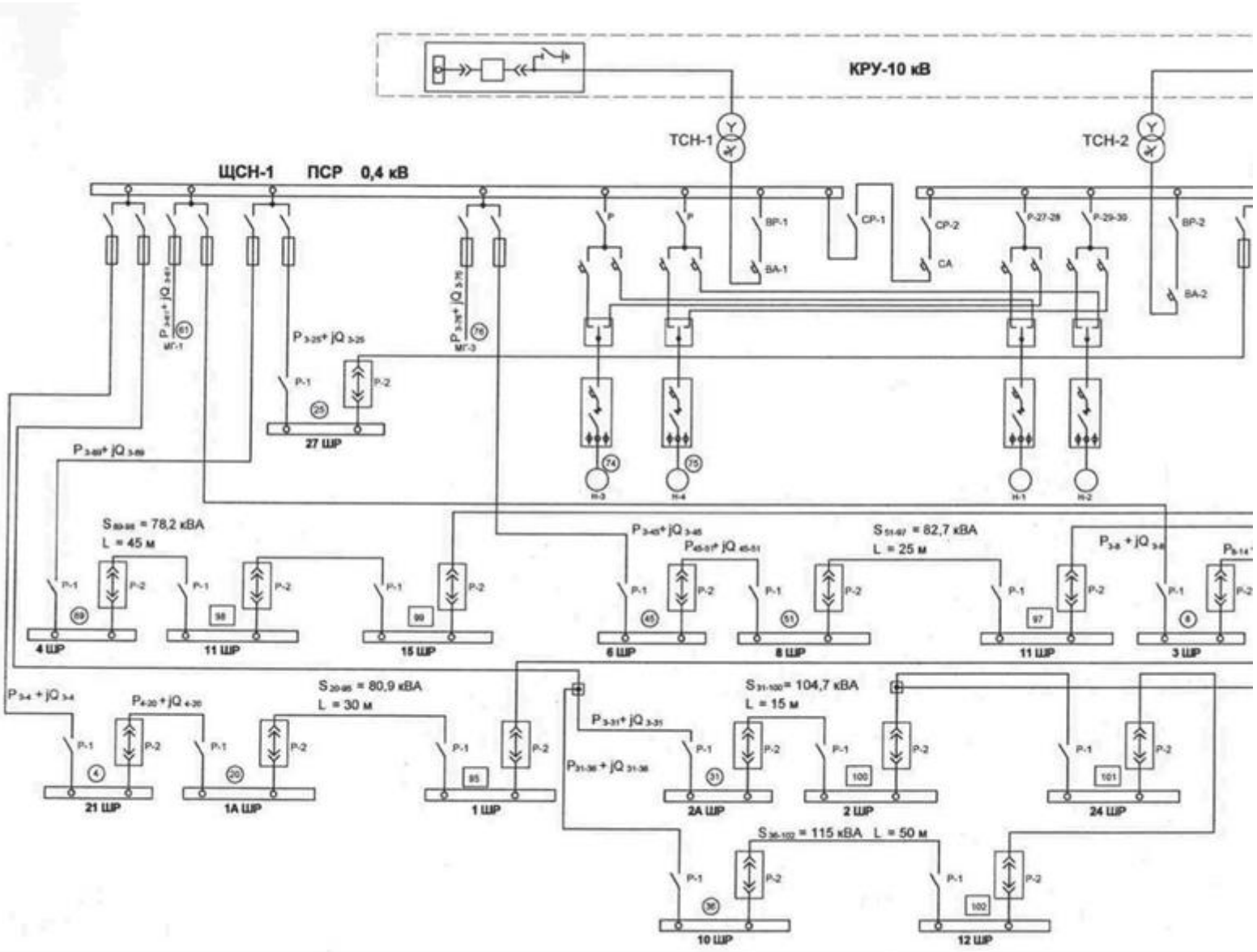


Рис. 3.2. - Схема підстанції власних витрати підприємства № 1

Для розподілу електроенергії між споживачами застосовані шафи розподільні (ШР), які живляться від збірних шин секції підстанції по радіальній схемі. Велика частина ШР територіально розташована максимально близько до споживача, але на значному віддаленні від шин секцій підстанції (див. Рис. 3.2) [106]. Якісний і кількісний склад споживачів секцій підстанції практично однаковий, тому розрахунок робився для однієї секції підстанції.

Схема містить 94 вузла і 86 гілок. Н-1, Н-2, Н-3 і Н-4 - насоси системи водяного охолодження технологічного обладнання, електроприводами яких є асинхронні двигуни типу 4АМ, технічні характеристики приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики електродвигуна типу 4АМ

Найменування параметру	Значення параметра
Номінальна потужність, кВт	132
Номінальна напруга, В	380
Номінальний струм, А	240
Частота обертання ротора, об /	1470
КПД, %	93,5
Коефіцієнт реактивної потужності, $tg\varphi$	0,46

МГ-1, МГ-2, МР-3, МР-4 - магістралі електроживлення підкачуючих компресорів, що представляють собою кабельні лінії, до яких за коштами відгалужувальних кабельних затискачів підключені компресори. У компресорах як приводних механізмів використовуються асинхронні електродвигуни, активна потужність яких $P = 9\,кВт$, реактивна - $Q = 8,7 кВАр$. У кожній магістралі від 10 до 14 компресорів.

Оскільки споживачі ШР однотипні, то для зменшення заповнення схеми вони не наведені на рис. 3.2.

Приклади електропостачання типових споживачів ШР (мережі освітлення, припливної вентиляції, витяжної вентиляції) наведені на рис. 3.3 - 3.5. Від ШР живляться насоси установки водопідготовки охолодження основного

технологічного обладнання, електрообладнання систем припливної і витяжної вентиляції, мережа освітлення.

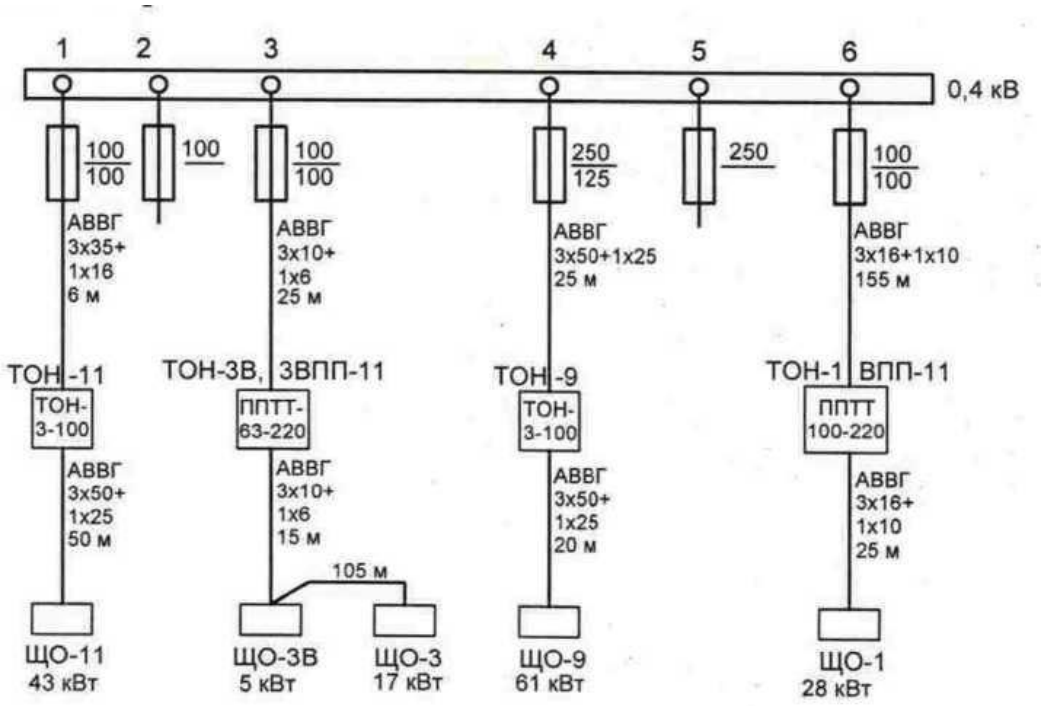


Рис. 3.3 - Електропостачання споживачів

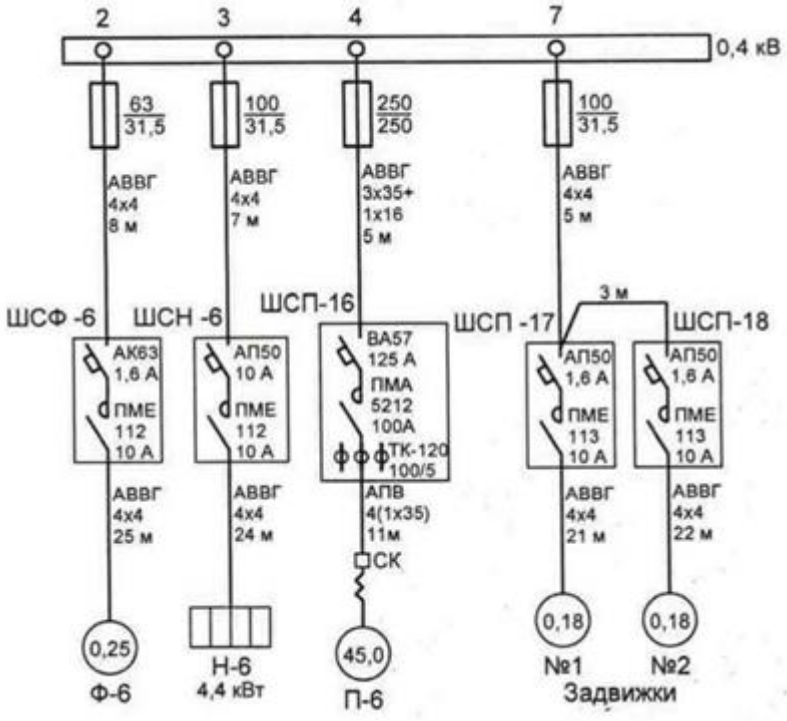


Рис. 3.4 - Електропостачання споживачів системи припливної вентиляції

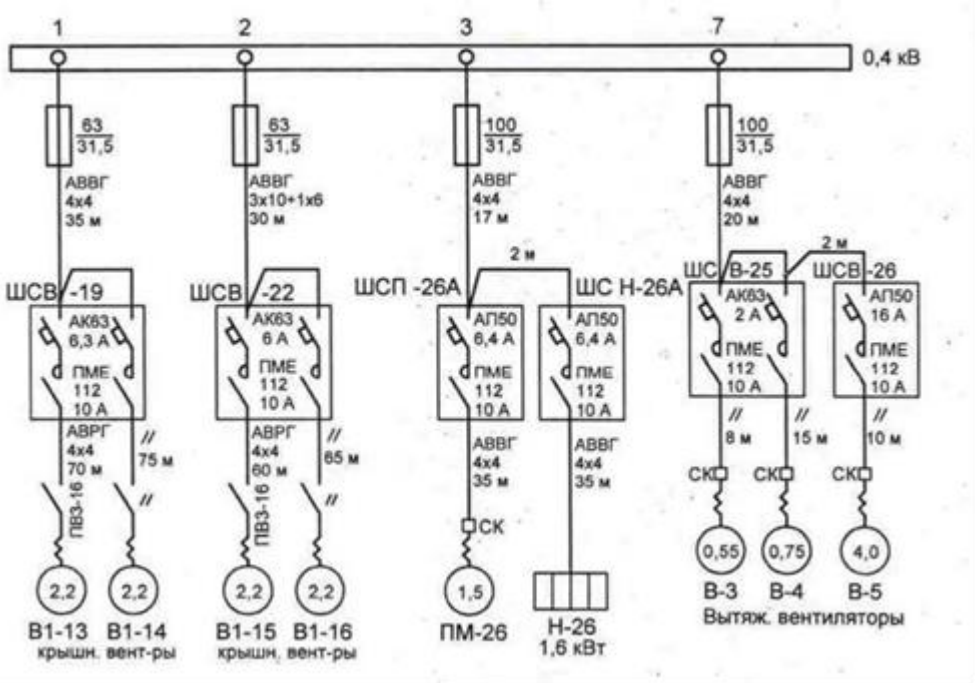


Рис. 3.5 - Електропостачання споживачів системи витяжної вентиляції, місцевої припливної та витяжної вентиляції

Типи електрообладнання з їх технічними характеристиками зведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики електроприймачів ШР

Найменування електрообладнання	Тип електрообладнання	$P_{ном.}$, кВт	$U_{ном.}$, В	КПД, %	$tg\varphi$	n, об/хв.
1	2	3	4	5	6	7
Електродвигун припливної вентиляції	4А25086УЗ	45	380	91,5	0,51	985
Електронагрівач клапану зовнішнього повітря припливного вентилятора	КВУ 1800х1000	4,4	380			
Електропривод для перемотування фільтру	4АА63А4	0,25	380	68	1,17	1500
Електропривод засувки	4АА56В4	0,18	380	64	1,20	1500
Електродвигун витяжної вентиляції	4А90Ь6	2,2	380	81	0,94	1000
Електрообладнання місцевої витяжної вент. системи	4ААМ63В2	0,55	380	67,5	0,99	1000
Електрообладнання місцевої витяжної вент. системи	АИР80А6	0,75	380	69	0,91	1000
Електрообладнання місцевої витяжної вент. системи	4А100 Ь4УЗ	4	380	84	0,65	1500

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7
Електрообладнання місцевої припливної вент. системи	АИР80В4УЗ	1,5	380	78	0,67	1500
Електронагрівач клапана зовнішнього повітря місцевої припливної вент. системи	КВУ 1600х1000	1,6				
Насоси установки водопідготовки	1,5ХГ-3К-2,8-5-У2	2,8	380	80	0,96	1370

Схема заміщення першої секції підстанції власного витрати (ЩСН-1) наведена на рис. 3.6.

Для підвищення точності розрахунку опорів кабельних ліній в програму були введені дані з [107] про питомі опорах ліній.

3.4. Математична модель системи електропостачання промислового підприємства

При розгляді ЩСН-1 було прийнято:

- споживана активна потужність фіксована і визначається номінальним значенням електроприймачів;

- потенційно можливі місцями для установки КУ - все шафи ШР.

Завдання КРМ полягає в мінімізації втрат активної потужності: $(\Delta P(Q) \to \min)$

- мінімізації втрат активної потужності при передачі електричної енергії по кабельних лініях $(\Delta P(Q) \to \min)$ за рахунок вибору оптимальних значень реактивної потужності КУ і місць їх установки;

- забезпечення мінімуму приведених витрат на компенсуючі пристрої $(З_Q \to \min)$

$$\begin{cases} \Delta P(Q) \to \min \\ З_Q \to \min \end{cases}$$

Цю двокритеріальну задачу шляхом лінійної згортки можна звести до однокритеріальної, тобто звести рішення задачі мінімуму фінансових витрат.

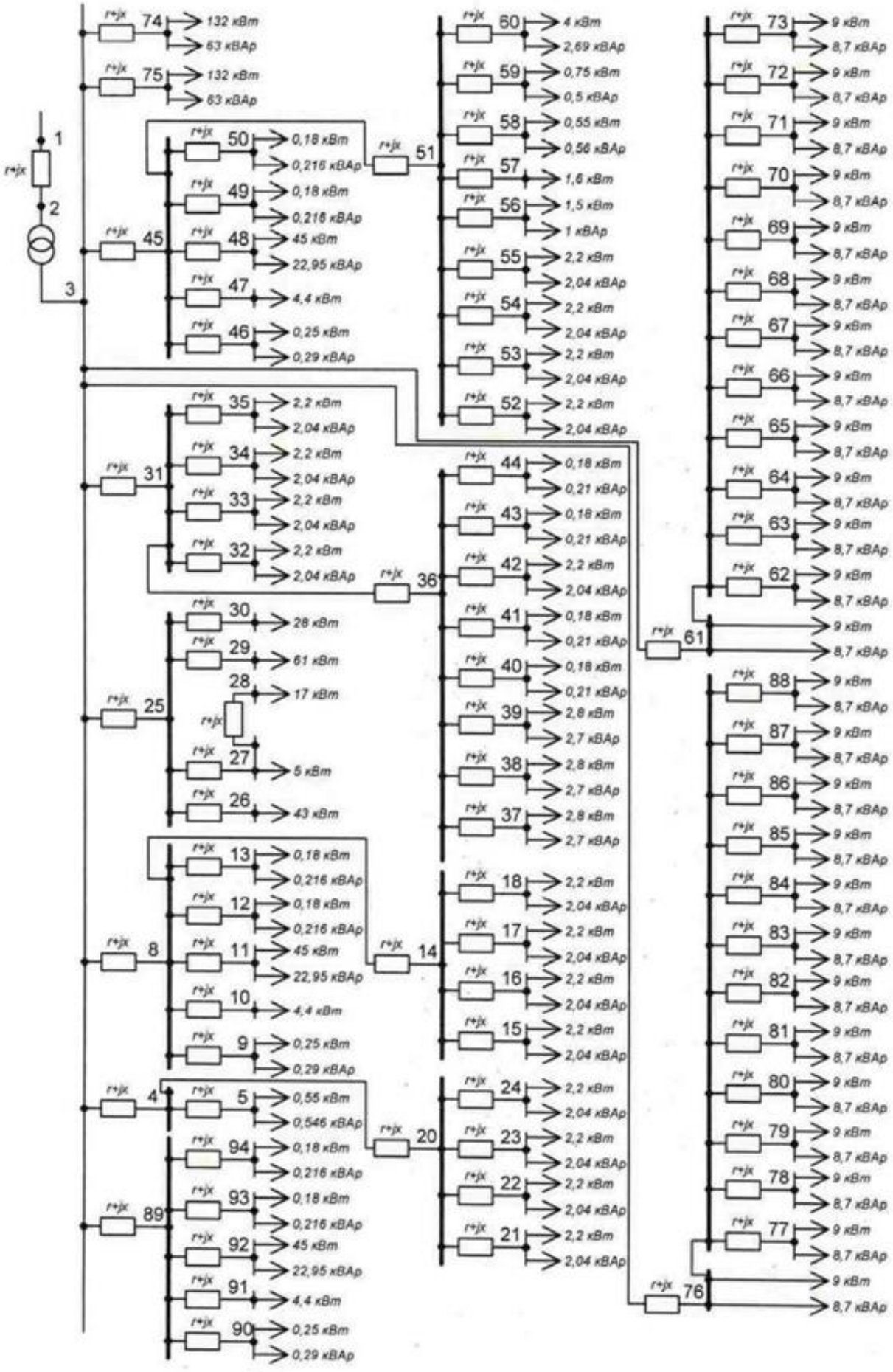


Рис. 3.6. - Схема заміщення ЩСН-1

Вказана підстанція є частиною розподільчої мережі підприємства. Купівля електроенергії підприємством здійснюється на шинах живильної підстанції мережевої компанії.

Тому втрати електроенергії у власних мережах підприємства оплачуються за повним тарифом покупки електроенергії

$$З_{\Delta P} = c_p \tau \Delta P(Q), \qquad (3.4)$$

де $c_р$ - тариф на електроенергію за 1 кВт-год, грн. / кВт-год;

τ - час максимальних втрат для електричної мережі, год;

$\Delta P(Q)$ - втрати активної потужності, кВт.

Час максимальних втрат визначається за формулою

$$\tau = \left(0{,}124 + T_м \cdot 10^{-4}\right)^2 \cdot 8760, \qquad (3.5)$$

де $Т_м$ - річне число використання максимуму навантаження, ч.

У розглянутій схемі обладнання працює практично цілодобово. З статистичних даних $Т_м$ = 8640 г, тоді τ = 8551 г.

Втрати активної потужності ΔP - це втрати в кабельних мережах.

Загалом випадки витрати за методикою дисконтованих витрат визначаються як

$$З = К + \sum_{t=t_0}^{T_р} B \cdot \left(1+E\right)^{-t}, \qquad (3.6)$$

де $К$ - капітальні вкладення на будівництво об'єкта, грн .;

$Т_р$ - розрахунковий період, роки;

t_0 - рік введення об'єкта в експлуатацію щодо початку розрахункового періоду;

B - експлуатаційні витрати або операційні витрати, які включають в себе витрати на технічне обслуговування, ремонт, вартість втрат електроенергії. Амортизаційні відрахування не є відтоком грошових коштів, тому їх до складу операційних витрат не включають, грн. / рік;

Е - ставка дисконтування.

Слід зазначити, що при виконанні досліджень ступеню компенсації реактивної потужності, втрати активної потужності були виділені з

операційних витрат як окремий параметр оптимізації, а оскільки розрахунки виконуються на одному рівні напруги, то рівень витрат на технічне обслуговування і ремонт однаковий. Тому в складі витрат на компенсуючі пристрої будемо враховувати тільки витрати на капітальні вкладення в конденсаторні установки

$$З_Q = E_н c_Q Q \qquad (3.7)$$

де $E_н$ - номінальний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, в енергетиці що дорівнює 0,12;

c_Q питома ціна встановлення КУ, грн./кВАр; Q - потужність встановлюваних КУ, кВАр.

Мета роботи - виконати аналіз ступеню компенсації, а не порівняти різні типи конденсаторних установок, тому питома вартість КУ c_Q була розрахована як середнє відношення ціни за однотипні конденсатори до їх потужності. Потужність встановлюваних КУ (Q_i) визначається значеннями реактивної потужності навантаження у вузлах схеми, яку необхідно компенсувати. Тоді, вираз (3.8) можна записати

$$\begin{aligned} &З_{Qк} = 0{,}12 \cdot c_Q \sum_{i=1}^{n} Q_i, \\ &0 < Q_i < Q_{\max i,} i = 1, ..., n \\ &Q_K = \{Q_1, Q_2, Q_3, ..., Q_n\}, \end{aligned} \qquad (3.8)$$

де n - кількість вузлів, в яких можна встановити конденсаторні установки;

Q_i - реактивна потужність конденсаторної установки в k- тому вузлі; Q_{maxi} - максимально допустимий рівень реактивної потужності КУ в k- тому вузлі, який обмежується споживаної реактивної потужністю вузла; Q_K - вектор потужностей КУ.

Значення коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ з критеріїв було переведено в обмеження, крім того $tg\varphi$ був обмежений знизу, тому що електричні мережі напругою до 1000 В характеризуються великою кількістю комутаційних перемикань, які в свою чергу можуть супроводжуватися як

провалами, так і сплесками напруги, тому значення $tg\varphi$ рівне нулю може привести до нестійкої роботи асинхронних двигунів. Значення коефіцієнта реактивної потужності рекомендовано постановою НКРЕ [68] і визначається значенням рівним 0,35. Науково-технічна література не призводить пояснення оптимальності цього значення. Природне значення $tg\ \varphi$ в мережах до 1000 В від 0,5 до 0,7. Можливо, для мереж низької напруги, $tg\ \varphi$ = 0,35 і є оптимальним значенням, тому при вирішенні оптимізаційної задачі верхнє значення коефіцієнта реактивної потужності обмежувалася значенням рівним 0,6.

В результаті була сформульована проектна оптимізаційна задача[108]:

$$З = c_p \tau \Delta P(\mathrm{Q}) + 0{,}12 c_Q \sum_{i=1} Q_i \to \min \qquad (3.9)$$

при наступних обмеженнях

$$0 < Q_i < Q_{\max i,} i = 1, ..., n$$
$$Q_K = \{Q_1, Q_2, Q_3, ..., Q_n\}$$
$$0{,}1 \le tg\varphi \le 0{,}6$$

Такий опис задачі є універсальним по відношенню до структури мережі. Можна сказати, що завдання (3.9) являє інтерфейс між «моделлю системи електропостачання» і використовуваним «методом оптимізації» [109]. Взаємодія за таким інтерфейсу проста:

1) в «метод оптимізації» формується якийсь варіант вирішення завдання (вектор Q_K);

2) в «моделі задачі» виконується розрахунок електричної мережі, визначається критерій і перевірять обмеження, і передаються результати в «метод оптимізації»;

3) отримавши оцінку поточного варіанту вирішення завдання, в «методі оптимізації» формується новий варіант вирішення, використовуючи отримані дані (які часто називають досвідом для методів штучного інтелекту), після чого повторюється перехід до пункту 2, поки не буде виконана умова зупинки.

Розрахунок електричної схеми виконувався за способом розрахунку потокорозподілення, який широко викладено в технічній літературі [33, 110, 111].

3.5. Оптимізація реактивної потужності з використанням генетичних алгоритмі

Джеймс Кеннеді і Рассел Еберхарт запропонували для вирішення оптимізаційних задач використовувати алгоритм рою частинок, в англійській літературі іменований PSO (ParticleSwarmOptimization) [112]. В основу алгоритму покладено візуальна модель опису поведінки зграї птахів, виконана фахівцем в області комп'ютерної графіки Крейг Рейнольдсом. Зграя птахів завжди діє скоординовано, кожен птах діє згідно простим правилам, стежить за іншими птахами і погоджує свій рух з ними. Знайшовши джерело їжі, птиця повідомляє про нього всієї зграї. Саме цей факт створює колективну поведінку і ройовий інтелект. Джерела їжі зазвичай розташовані випадковим чином в n-вимірному просторі, тому одному птахові дуже складно швидко знайти їх. Вся зграя зможе вижити, якщо птахи будуть обмінюватися інформацією.

Алгоритм рою частинок в подальшому отримав популярність як один з універсальних і ефективних алгоритмів ройового інтелекту, заснований на концепції децентралізованих систем.

PSO широко висвітлений в літературі, але не існує єдиної схеми його опису і єдиної системи позначень, тому в даній роботі наводиться короткий опис за схемою, яку у [113] для ясності подальшого викладу.

Введемо наступні позначення [113]:

f(X) - скалярна цільова функція (фітнес-функція), для якої потрібно знайти екстремальне значення;

X - вектор змінних параметрів;

D - область допустимих значень X, D є R|X|;

G(X) - функція, що задає обмеження на X;

|*S*| - кількість агентів популяції;

$S = \{s_1, s_2, \ldots S_{|S|}\}$ – множина всіх агентів;

X_{ij} - і-й агент на ітерації алгоритму;

X^{bset} - оптимальне значення вектора змінних параметрів;

f^{best} - оптимальне значення цільової функції;

$\varphi(X) = f(X)$ - значення фітнес-функції в положенні (фітнес агента).

Вирішується задача знаходження мінімуму функції

$$f^{best} = f\left(X^{best}\right) = min_{X \in D} f\left(X\right) \qquad (3.11)$$

Вектор змінних параметрів X може набувати значень з деякої області D. На початку частки розкидані випадковим чином по всій області пошуку, при цьому кожна частка має випадковий вектор швидкості. Кожна частинка в кожен момент часу характеризується значенням параметрів X з області D (координатами точки в просторі рішень) і значенням функції оптимізації $f\left(X\right)$ (привабливістю даної точки). При цьому частка «пам'ятає» найкращу точку в просторі рішень, в якій була, і прагне до неї повернутися, але підпорядковується також закону інерції і має схильність до невеликого стохастичній зміні напрямку руху. В якості зв'язку між частинками використовується так звана спільна пам'ять, завдяки якій кожна частка знає координати найкращої точки серед усіх, в яких була будь-яка частка рою. У підсумку на рух частинки впливають:

- прагнення до свого найкращого стану;
- прагнення до найкращого серед всіх частинок положення;
- інерційність;
- випадкові відхилення.

Робота алгоритму завершується:

- при досягненні заданого числа ітерацій;
- при досягненні задовільного рішення;
- після закінчення відведеного на роботу часу.

Згідно [113], алгоритм рою частинок PSO можна уявити як набір

$$\{S, M, A, P, I, O\}$$

де S – множина агентів (часток),

M - засіб непрямого обміну інформацією між частинками;

A - правила переміщення агентів;

P - параметри алгоритму;

I та *O* - вхід і вихід рою для взаємодії із зовнішнім середовищем.

На *j*-й ітерації *i*-а частинка характеризується станом

$$S_{ij} = \{X_{ij}, V_{ij}, X_{ij}^{best}\},$$

де $X_{ij} = \{x_{ij}^1, x_{ij}^2 ..., x_{ij}^l\}$ - вектор змінних параметрів (положення частинки);

$V_{ij} = \{v_{ij}^1, v_{ij}^2 ..., v_{ij}^l\}$ - вектор швидкостей частинки;

$X_{ij}^{best} = \{b_{ij}^1, b_{ij}^2 ..., b_{ij}^l\}$ - найкраще за значенням фітнес-функції положення частинки серед всіх положень, які вона займала в процесі роботи алгоритму від 1-ї до j-ї ітерацій;

l - кількість варійованих параметрів.

Вектор – $M = X_j^{best}$ оптимальні значення вектора змінних параметрів, які були отримані серед всіх частинок від 1-ї до j-ї ітерації алгоритму.

Алгоритм *A* описує механізми функціонування рою частинок і складається з декількох етапів.

1. Генерація початкових положень і швидкостей 0 = 1):

$$X_{i1} = rand\ (G(X)),\ i = 1, \ldots, |S|, \qquad (3.14)$$

де, $rand\ (G(X))$ - вектор рівномірно розподілених випадкових величин, що відповідають обмеженням на область пошуку O;

$$V_{i1} = rand\ (V_{min}, V_{max}),\ i = 1, \ldots, |S|, \qquad (3.15)$$

де, $rand(V_{min}, V_{max})$ - вектор рівномірно розподілених випадкових величин в діапазоні (V_{min}, V_{max}).

$$X_{i1}^{best} = X_{ij}, i = 1, ..., |S|. \qquad (3.16)$$

Довільно вибирається найкраща позиція (при обчисленні фітнес - функцій буде визначена дійсно найкраща позиція):

$$X_1^{best} = X_{11}. \qquad (3.17)$$

2. Обчислення фітнес-функцій і визначення найкращого положення.

$$\begin{aligned} \mathrm{X}_{ij}^{\text{best}} &= X_{ij}, \varphi(\mathrm{X}_{ij}^{\text{best}}) < \varphi(X_{ij}), i = 1,...,|S|, \\ \mathrm{X}_{j}^{\text{best}} &= X_{ij}, \varphi(\mathrm{X}_{j}^{\text{best}}) < \varphi(X_{ij}), i = 1,...,|S|, \end{aligned} \quad (3.18)$$

Обчислення $\varphi(X) = f(X)$ відбувається у зовнішньому середовищі за допомогою обміну даними по зворотного зв'язку *($I_{o.c.}$, $O_{o.c.}$).*

3. Переміщення частинок з урахуванням обмежень на положення і швидкості (Векторів V_{max}, D_{min}, D_{max}):

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + a_1(\mathrm{X}_{ij}^{\text{best}} - X_{ij})r_1 + a_2(M - X_{ij})r_2,\ i = 1,...,|S|; \quad (3.19)$$

$$v_{ij+1}^k = \begin{cases} v_{ij+1}^k, v_{ij+1}^k \le v_{\max}^k \\ v_{\max}^k, v_{ij+1}^k \ge v_{\max}^k \end{cases}, i = 1,...,|S|,\ k = 1,...,l; \quad (3.20)$$

$$v_{ij+1}^k = \begin{cases} x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k, d_{\min}^k \le x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \le d_{\max}^k; \\ d_{\min}^k, x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \le d_{\min}^k; \\ d_{\max}^k, x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \le d_{\max}^k; \\ i = 1,...,|S|, k = 1,...,l; \end{cases} \quad (3.21)$$

де, r_1 та r_2 - вектори випадкових чисел, рівномірно розподілені в інтервалі [0,1]. Розрахунок за пунктом 2.

4. Якщо на j- й ітерації виконана умова зупинки, то значення

$$\mathrm{X}_{\text{final}}^{\text{best}} = \mathrm{X}_{j}^{\text{best}} \quad (3.22)$$

подається на вихід *O,* як рішення задачі. Інакше відбувається перехід до етапу 3.

$P = \{a_1, a_2, \omega, V_{\max}\}$- параметри PSO, які використовуються у формулі і впливають на переміщення частинок в просторі пошуку. Параметри a_1 та a_2 визначають, відповідно, ступінь обліку індивідуального і групового досвіду агентів. Параметр характеризує інерційні властивості частинок. Вектор Вухах обмежує швидкості частинок. У класичному РБО приймають, що, це означає, що $V_{\max} = (D_{\max} - D_{\min})$ частка за один крок може перетнути весь простір пошуку. Однак можна припустити, що через високі швидкості частинки можуть пропускати ефективніші екстремуми і потрапляти в менш ефективні. Тому

використовується додатковий параметр β, що обмежує швидкість частинок, в такий спосіб [114]:

$$V_{\max} = \beta(D_{\max} - D_{\min}) \qquad (3.23)$$

В цьому випадку можна записати $P = \{a_1, a_2, \omega, \beta\}$. Такий підхід може підвищити ефективність алгоритму, завдяки зниженню ризику пропуску «хороших» екстремумів, і в той же час він є таким же простим, як і оригінальний PSO, на відміну від робіт, що пропонують більш складні динамічні правила управління швидкостями частинок, наприклад, [115]. Як видно з наведених етапів взаємодії, спосіб розрахунку показників $З_{\Delta P}, З_{\text{QK}}$ може бути будь-яким, оскільки він не залежить від використовуваного алгоритму оптимізації. Так само і алгоритм оптимізації не залежить від розрахунків показників системи. Такий підхід дозволяє легко застосовувати різні методи оптимізації, так як зміни в електричній схемі не приведуть до необхідності міняти що-небудь в реалізації оптимізаційного методу. Іншими словами, забезпечується відсутність тісних залежностей між завданням оптимізації і методом її вирішення, підвищується гнучкість підходу.

Модель для алгоритму оптимізації є чорним ящиком з певним інтерфейсом. Дана модель отримує на вхід вектор-стовпець Q_K і повертає критерії $З_{\Delta P}, З_{\text{QK}}$, значення $tg\,\varphi, З$. Необхідно встановити відповідність між позицією частки *X* і вектором, що задає розміщення компенсуючих пристроїв в мережі Q_K. Найпростіший спосіб - покласти $x_i = Q$, але максимально допустиме значення потужності КУ в кожному з вузлів заздалегідь невідомо, тому неможливо заздалегідь визначити межі простору пошуку рішень $d_{min1}, d_{max1}, \ldots, d_{minm,} d_{maxm}$, що призводить до залежності реалізації методу оптимізації від умов завдання.

При розробці описуваного підходу було вирішено уникати тісних залежностей завдання оптимізації і методи оптимізації, щоб забезпечити гнучкість і універсальність підходу [116]. Тому була використана наступна техніка: вектор використаний не як вектор потужностей КУ, а як вектор

коефіцієнтів, так що потужність кожної КУ визначалася як добуток елемента вектора на певну в ході розрахунків максимально допустиму потужність КУ в відповідному вузлі:

$$Q_i = x_i \cdot Q_{i\max}. \qquad (3.24)$$

Якщо Q_i близько до нуля, то вважається, що КУ в і-му вузлі не буде встановлено. В результаті в описі алгоритму рою частинок можна усунути залежність обмежкень $d_{min1}, d_{max1}, \ldots, d_{minm,} d_{maxm}$ від особливостей схеми, що оптимізується $(d_{min1} = 0 \; and \; d_{max1} = 1, \quad i = 1,\ldots,m)$. Оскільки розмірність пошуку рішень дорівнює кількості вузлів, що розглядаються в якості потенційних місць установки КУ, то *n* дорівнює *m*.

Таким чином, позиція кожної частки алгоритму рою частинок означає якийсь варіант розміщень КУ і їх потужностей. Для кожної позиції за допомогою моделі обчислюється критерій 3 і значення $tg\varphi$. Обмеження на $tg\varphi$ не враховуються в векторах D_{min} і D_{max}, але якщо для даного варіанту розміщення КУ не підходить під обмеження, тоді використовуючи метод штрафних функцій [117], до значення критерію оптимізації додають штраф, значення якого на порядок більше ніж можливе значення критерію *3*. Таким чином, частки, що опинилися в позиціях, які не задовольняють обмеженням, отримають дуже високі значення критерію і будуть прагнути вийти з таких позицій. В результаті відповідність алгоритму і завдання оптимізації можна записати в такий спосіб:

$$f(X) = W(XQ_{\max}) + y(tg\varphi(X))$$
$$y(tg\varphi(X)) = \begin{cases} 0, & 0{,}1 \le tg\varphi(X) \le 0{,}6 \\ W_{large}, & tg\varphi(X) < 0{,}1 \; або \; tg\varphi > 0{,}6, \end{cases} \qquad (3.25)$$

де $y(tg\varphi(X))$ - штрафна функція;

W_{large} - число набагато більше, ніж найгірше значення критерію без компенсації.

При цьому опис алгоритму рою частинок не містить залежностей від моделі завдання (3.9), і модель (3.9) не залежить від реалізації алгоритму.

Таким чином, врахування особливостей завдання виконується безпосередньо в процесі роботи алгоритму рою частинок, завдяки його інтелектуальній спроможності дослідити простір пошуку рішення.

Для вирішення завдань оптимізації алгоритмом рою частинок потрібно налаштування параметрів. Налаштування параметрів дозволяє підвищити впевненість в тому, що дійсно було отримано рішення близьке до оптимального. У роботах [72, 114, 118] показано, що найбільш ефективним методом налаштування є техніка мета-оптимізації. Мета-оптимізація передбачає розгляд завдання підбору параметрів як окремого завдання оптимізації. При цьому будь-якої алгоритм оптимізації вирішує прикладну задачу, а мета-оптимізація підбирає параметри цього алгоритму для отримання найкращих рішень прикладної задачі.

В роботі [114] такий підхід був використаний для настройки алгоритму рою частинок для вирішення оптимізаційних задач теорії розкладів. Як мета-оптимізатора був обраний генетичний алгоритм. ГА для підбору параметрів обраний по аналогії з еволюційним відбором, принципи якого він використовує. У даній роботі використаний цей же підхід, але вже для алгоритму рою частинок.

Схема роботи ГА аналогічна блок-схемі показаної на рис. 2.2.

Параметри алгоритму рою частинок $\{a_1, a_2, \omega, \beta\}$ використовуються як гени Г А, а якість отриманого на цьому наборі параметрів рішення задачі (3.9) приймається за значення функції пристосованості. Роботу, отриманого адаптивного алгоритму, можна представити таким чином:

1. Генерація початкової популяції як набору векторів $\{a_1, a_2, \omega, \beta\}$. В даній роботі $0 < a_1 < 2;\ 0 < a_2 < 2;\ 0 < \omega < 1;\ 0{,}1 < \beta < 1.$

2. Рішення завдання (3.9) алгоритмом рою частинок з використанням кожного з набору параметрів. Якщо отримано рішення (варіант розміщення КУ) краще попередніх, то воно зберігається в пам'яті.

3. Вибір векторів параметрів з урахуванням їх пристосованість і схрещування для отримання нової популяції векторів. У цьому завданню використовувався одноточковий кроссинговер.

4. Випадкові зміни в значеннях параметрів. Імовірність зміни одного вектора становила 15%.

5. Якщо умова завершення виконано, то завершення роботи, інакше перехід до пункту 2.

Краще рішення, збережене в пункті 2, буде шуканим рішенням задачі оптимізації. Як умова завершення використовувалося досягнення певної кількості ітерацій ГА. У розрахунках використовувалося 40 хромосом і 100 ітерацій ГА. Адаптація дозволила отримати ефективний набір параметрів $\{a_1 = 1{,}41826; a_2 = 1{,}70733; \omega = 0{,}671682;\ \beta = 0{,}729057\}$. Потім ці ж параметри були використані в звичайному алгоритмі рою частинок для вирішення завдання (3.9) [119, 120].

Оскільки цей підхід не залежить від структури завдання оптимізації і реалізації алгоритму рою частинок, він є досить гнучким і може бути використаний без зміни для різних завдань оптимізації. Знайдені за допомогою адаптації хороші параметри можуть бути використані для вирішення завдань, подібних до тієї, на якій ці параметри були визначені. Іншими словами, якщо умови задачі оптимізації помінялися байдуже, то немає необхідності повторно виконувати адаптацію, можна використовувати вже знайдені параметри. Головним недоліком підходу є високий час обчислень (від декількох хвилин до декількох годин в залежності від розмірності задачі і використовуваної обчислювальної системи). Розглянуте завдання не є завданням оперативного управління, тому цей недолік не є критичним і зазначений час вирішення прийнятно. Після налаштування параметрів алгоритму рою частинок час вирішення завдань (3.9) для розрахункової схеми рис. 3.2 становить кілька секунд.

3.6. Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість вузлів навантаження з асинхронними двигунами

Глибока компенсація реактивної потужності на промислових підприємствах і в вузлах навантаження повинна бути тісно пов'язана з впливом компенсації реактивної потужності на стійкість асинхронних машин при раптовій зміні зовнішніх умов їх роботи. До них можна віднести:

- коротке замикання в деякій точці електричної мережі;

- раптова зміна моменту на валу;

- провали напруги на живильних шинах подстанції. Механічний (крутний) момент на валу електродвигуна, створюваний навантаженням [121], для схеми заміщення асинхронного двигуна, см. рис. 3.7

$$M = \frac{m_1, U_1^2 r_2^{`}}{\omega_1 s\left[\left(r_1 + c_1 r_2^{`}/s\right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2^{`}\right)^2\right]} \qquad (3.26)$$

де m_1- число фаз;

U_1 - напруга мережі;

$r_2^{`}$ - наведене активний опір обмотки ротора;

ω_1 - синхронна частота обертання;

s - ковзання;

r_1 - активний опір обмотки статора;

c_1 - коефіцієнт приведення параметрів асинхронного двигуна до Г-подібною схемою заміщення,

x_1 - індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

$x_2^{`}$ - наведене індуктивний опір розсіювання обмотки ротора.

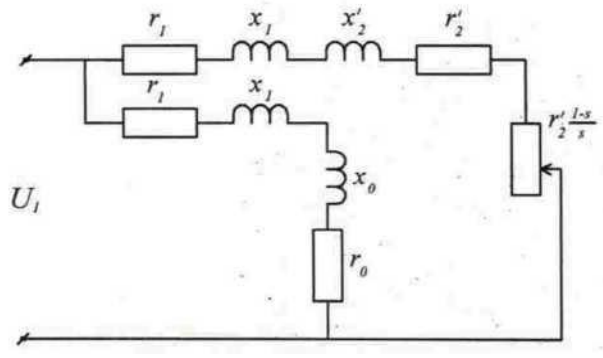


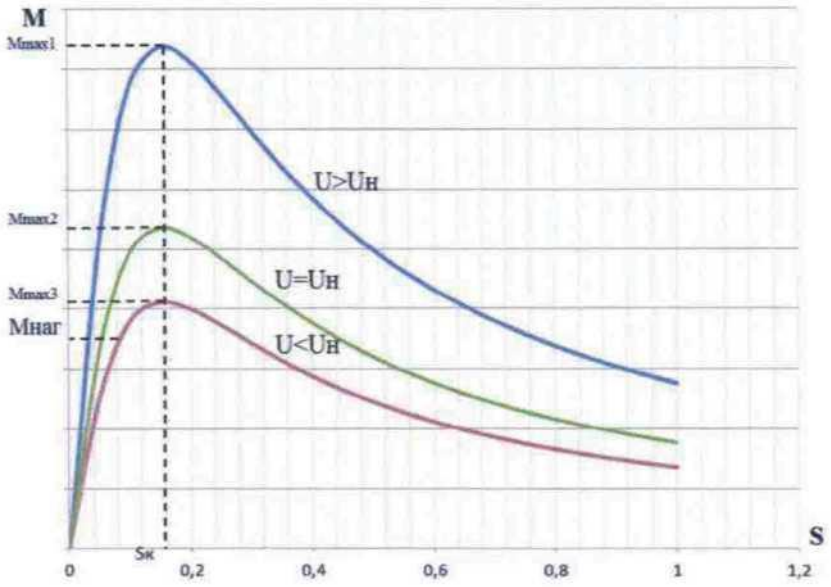
Рис. 3.7. - Схема заміщення асинхронного двигуна

Так як параметри $r_1, r_2^{`}, x_1, x_2^{`}$ асинхронного двигуна при роботі з різними частотами обертання (ковзаннями) залишаються майже незмінними, так само як і синхронна частота обертання, то величина електромагнітного моменту змінюється лише від напруги мережі і ковзання.

Вираз моменту (3.27) дає можливість побудувати механічну характеристику *M = f(s).* У момент пуску двигуна в хід *s=1,* а під дыэю пускового моменту M_n ротор двигуна приводиться в обертання, при цьому ковзання зменшується, а момент збільшується. При ковзанні $S_к$ момент досягає максимального значення, див. рис. 3.8.

Для визначення $S_к$ необхідно взяти похідну від (3.27) по б і прирівняти до нуля.

$$\frac{\partial M}{\partial s} = 0.$$



Рисю 3.8. - Механічні характеристики асинхронного двигуна

Шукане значення критичного ковзання

$$S_K = \pm \frac{r_2^{`}}{\sqrt{r_1^2 + \left(x_1 + x_2^{`}\right)^2}}. \qquad (3.27)$$

Знак «плюс» відповідає роботі асинхронної машини в режимі двигуна. У сталому режимі $M_{наг.}$ відповідає номінальному навантаженні двигуна. Стійка робота двигуна можлива при ковзанні $S<S_K$. З виразу (3.27) видно, що

електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги U_1 підводиться до обмотки статора. У той же час, аналіз виразу (3.28) показує, що величина критичного ковзання не залежить від U_1. Побудувавши механічні характеристики для різних значень U_1 можна побачити, що при незмінному навантаженні на валу, навантажувальний момент $M_{нат.}$ ковзання будуть різними. Зі зменшенням напруги ковзання збільшується (швидкість обертання зменшується). Змінюється і максимальне значення моменту, що призводить до зміни перевантажувальної здатності машини. Зміна напруги веде до зміни споживання асинхронним двигуном реактивної потужності, а збільшення споживання реактивної потужності призводить до ще більшого зменшення напруги, тому критерієм стійкості може служити і знак приросту реактивної потужності при зміні напруги

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = 0. \qquad (3.28)$$

Перетворимо схему заміщення асинхронного двигуна, см. Рис. 3.9.

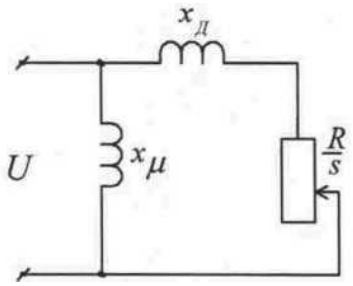


Рис. 3.9. - Змінена схема заміщення асинхронного двигуна

Тоді вираз (3.27) можна записати як

$$S_K = \frac{R}{X_Д}. \qquad (3.29)$$

Значення критичної напруги

$$U_K = \sqrt{2\beta P_{ном} X_Д}, \qquad (3.30)$$

де, β - коефіцієнт завантаження асинхронного двигуна

$$\beta = \frac{P}{P_{ном}}.$$

Асинхронні двигуни споживають реактивну потужність, яка складається з двох складових; потужності намагнічування Q_μ і потужності розсіювання Q_s:

$$Q_{АД} = Q_\mu + Q_s \qquad (3.31)$$

Ці складові розраховуються

$$Q_\mu = \frac{U^2}{x_\mu} = I_\mu U \qquad (3.32)$$

де, I_μ - струм намагнічування, який чисельно дорівнює струму холостого ходу;

$$Q_s = I^2 x_Д, \qquad (3.33)$$

де, $x_Д$ - опір двигуна при Г-образної схемою заміщення,

I - струм навантаження.

Зміна залежності $Q_\mu = f(U)$ наведено на рис. 3.10.

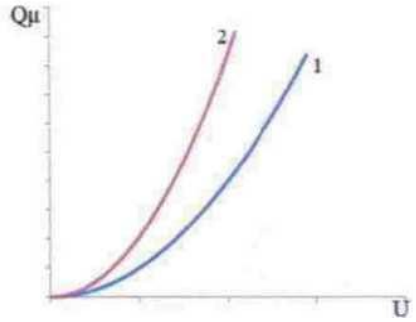


Рис. 3.10. - Залежність потужності намагнічування від напруги

В [122] показано, що якщо вважати насичення стали постійним і його не враховувати, то $Q_\mu = f(U)$ - це квадратична парабола, крива 1 на рис. 3.10.

В дійсності x_μ змінюється в залежності від підведеної напруги $Q_\mu = f(U)$. Опір x_μ: зменшується з ростом напруги, і тому характеристика $Q_\mu = f(U)$ проходить вище квадратичної параболи, крива 2 на рис. 3.10.

Вираз (3.31) можна представити

$$Q_s = I^2 x_Д = \frac{U^2 x_Д s^2}{R^2 + x_Д^2 s^2} = \frac{P_{АД} x_Д s}{R} \qquad (3.34)$$

де $P_{АД}$ - активна потужність асинхронного двигуна.

З виразу (3.34) видно, що при постійній $P_{АД}$ потужність розсіяння пропорційна ковзанню $(Q_s \sim s)$. При зміні напруги ковзання змінюється відповідно до кривої, представленої на рис. 3.11. Отже, $Q_s = f(U)$ двигуна буде аналогічна залежності, представленої на рис. 3.11. Якщо графічно скласти складові Q_μ і Q_s, то $Q_{АД} = f(U)$ представлена на рис. 3.12, де гілка, яка вище $U_{кр}$ - це зона нестійкої роботи асинхронного двигуна.

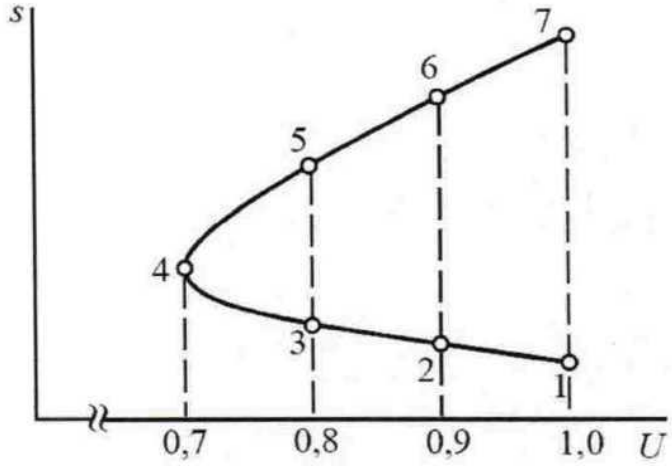


Рис. 3.11. - Залежність ковзання від напруги

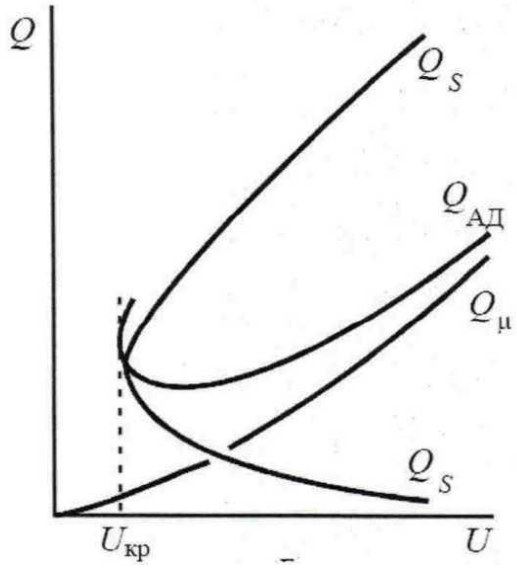


Рис. 3.12. - Залежність реактивної потужності двигуна від напруги

Передбачається, що при номінальній напрузі в електричній мережі реактивна потужність компенсуючого пристрою дорівнює реактивній потужності асинхронного двигуна $(Q_{КУ} = Q_Д)$схема заміщення представлена на рис. 3.13.

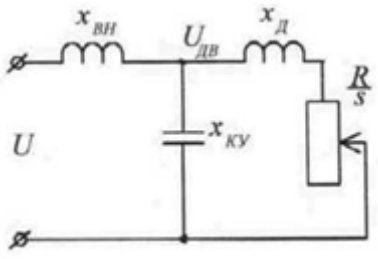


Рис. 3.13. - Схема заміщення асинхронної навантаження з компенсуючим пристроєм

$x_{ВН}$ - це зовнішній опір мережі, яке включає опір лінії, трансформатора, генератора.

Тоді опір мережі з урахуванням компенсуючого пристрою дорівнюватиме еквівалентному опору $x_{ЕК}$

$$x_{ЕК} = \frac{x_{КУ} \cdot x_{ВН}}{x_{КУ} - x_{ВН}}, \qquad (3.35)$$

а вираз (3.30) буде перетворено як

$$U_{ЕК.К} = \sqrt{2\beta \cdot P_{ном}\left(x_Д - x_{ЕК}\right)}. \qquad (3.36)$$

В [123] показано, що якщо опір двигуна менше еквівалентного опору $(x_{ЕК} / x_Д > 1)$, то статична стійкість вузла навантаження зменшується, тому що збільшується значення мінімального критичної напруги. Якщо еквівалентний опір мережі менше опору двигуна $(x_{ЕК} / x_Д < 1)$, статична стійкість збільшується, тому що мінімальне критичне напруження зменшується. Таким чином, чим більше різниця в співвідношенні опорів, тим більше позитивний вплив на статичну стійкість надає компенсація реактивної потужності.

З точки зору динамічної стійкості, дослідження [123] показали, що при трифазному короткому замиканні вибіг ротора двигуна при повній компенсації реактивної потужності трохи швидше, ніж при відсутності компенсації. Така ж закономірність зберігається при запуску асинхронного двигуна. У мережі з повною компенсацією реактивної потужності тривалість запуску асинхронного

двигуна менше, ніж при відсутності компенсації. Отже, вибір потужності компенсуючих пристроїв слід обов'язково розглядати при використанні асинхронних двигунів, при чому компенсація реактивної потужності сприятливо впливає на статичну стійкість двигуна. При цьому установка компенсуючих пристроїв дає завжди позитивний ефект для підвищення напруги. Слід мати на увазі, що при компенсації реактивної потужності динамічна стійкість дещо зменшується за рахунок більш швидкого вибігу ротора двигуна. У зв'язку з наведеними дослідженнями в даній роботі прийнятий невеликий запас по компенсації реактивної потужності до $tg\varphi = 0{,}1$, а не $tg\varphi = 0$. З точки зору втрат активної потужності в мережі, він збільшується на 1%, що не суттєво. Зате динамічні процеси дещо покращуються.

3.7. Результати рішення задачі оптимізації реактивної потужності

Весь комплекс розрахунків був реалізований в середовищі MATLAB. Алгоритм рою частинок запускався 50 разів для періодів часу: 1, 2, 3 і 4 роки.

З метою визначення параметрів схеми і природного коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ був виконаний розрахунок завдання (3.9) без компенсації, тобто $З_{QK} = 0$.

Розрахунок показав, що при максимальній зміні навантаження значення $tg\varphi$ на шинах ПСР (вузол 3) становить 0,54.

Результати втрат активної потужності, значення 3 для тарифу (2,34 грн. / кВт-год) і за умови $З_{QK} = 0$. для однієї секції підстанції власного витрати зведені в таблицю 3.5. В даному випадку $З = З_{\Delta P}$.

Таблиця 3.5 - Результати рішення задачі (3.9) для однієї секції підстанції без компенсації

Глибина компенсації	Сумарна потужність КУ, кВАр	Втрати активної потужності $\Delta P, кВт$	Втрати електроенергії в грн, тис. кВт год	Критерій завдання (3.9) З, (млн. грн..)	$tg\varphi$
Без компенсації	0	55,19	472,00	1,10	0,54

Дана підстанція складається з двох секцій, а на підприємстві чотири підстанції з аналогічними споживачами і приблизно з однаковим навантаженням. Таким чином, підприємство витрачає на оплату втрат активної потужності в кабельних лініях близько 9 млн. рублів на рік, див. Таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 - Значення втрат електроенергії на підприємстві в цілому на ПСР без компенсації реактивної потужності

Втрати активної потужності на однієї секції ΔP, кВт	Втрати активної потужності на одній підстанції Р, кВт	Втрати активної потужності на чотирьох підстанціях Р, кВт	Втрати електроенергії на підприємстві в рік, МВт-год	Витрати підприємства на оплату втрат в рік, (млн. грн.)
55,19	110,38	441,52	3,78	8,83

Виконавши розрахунок оптимізаційної задачі (3.9) при обмеженнях (3.10) для c_Q=400грн./кВАр, отримаємо наступні значення: $tg\varphi = 0{,}10$; $\Delta P = 33{,}51 кВт$; - необхідна величина потужності компенсації - 413,96 кВАр; $З$ = 835,99 тис. грн..

Розподіл реактивної потужності по вузлах зведено в таблицю 3.7.

Для конденсаторних установок, оснащених регулюючим пристроєм, питома вартість c_Q, зростає. Приймемо c_Q = 550 грн. за 1 кВ Ар і виконаємо розрахунок оптимізаційної задачі (3.9) при обмеженнях (3.10). Результати розрахунку зведені в таблицю 3.7.

Рішення завдання дає наступні значення:

$tg\varphi$ = 0,10; ΔP = 33,50 кВт;

- сумарна потужність компенсуючих пристроїв - 413,95 кВАр; $З$ = 897,95 тис. грн.

Таблиця 3.7 - Розподіл реактивної потужності по вузлах

Номер вузла	Розрахункова величина потужності, що компен-сується Q, кВАр при c_Q = 400 грн. / кВАр	Розрахункова величина потужності, що компенсується, Q, кВАр при c_Q = 550 грн. / кВА	Номер вузла	Розрахункова величина потужності, що компенсується, Q, кВАр при c_Q = 400 грн. / кВАр	Розрахункова величина потужності, що компен-сується, Q, кВАр при c_Q = 550 грн / кВА
1	2	3	4	5	6
20	0	0	51	12,96	12,96
4	0	0	45	13,86	14,67
14	8,19	8,23	61	103,83	113,16
8	23,90	21,01	74	59,50	5811
Продовження таблиці 3.7					
1	2	3	4	5	6
25	0	0	75	42,69	44,61
36	10,98	6,85	76	109,17	113,18
31	8,18	0	89	20,69	21,19

Результати показують, що при збільшенні питомої вартості c_Q (рішення задачі алгоритмом рою частинок, як і в першому випадку, визначає оптимальне значення коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$=0,10, при цьому не значно перерозподіляються величини компенсуючих потужностей у вузлах, а кінцева сумарна величина залишається незмінною і незмінним залишається значення втрат активної потужності. Таким чином, втрати в кабельних лініях знижуються на 39,1% (були 55,19 кВт, стали 33,51 кВт), а підприємство може зменшити витрати на оплату втрат електроенергії на 3,5 млн. рублів на рік, що видно при зіставленні значень таблиць 3.6 і 3.8.

Таблиця 3.8 - Значення втрат електроенергії на підприємстві в цілому на ПСР при КРМ

Втрати активної потужності на одній секції Р, кВт	Втрати активної потужності на одній підстанції Р, кВт	Втрати активної потужності на чотирьох підстанціях Р, кВт	Втрати електроенергії на підприємстві в рік, МВт год	Витрати підприємства на оплату втрат в рік, (млн. грн.)
33,51	67,02	268,08	2,29	5,36

На ринку багатоступеневих конденсаторних установок ціна за 1 кВАр коливається від 550 грн. до 2000 грн., залежно від виробника і потужності установки. Для чистоти експерименту виконаємо розрахунок для більш дорогих конденсаторних установок. Дотримуючись прайс-листу [124], середня питома ціна компенсації реактивної потужності становить 1840 грн./кВАр. Виконаємо розрахунок оптимізаційної задачі (3.9) при обмеженнях (3.10) для c_Q = 1840 грн./ кВАр і чотирьох періодів часу: 1, 2, 3 і 4 роки.

Рішення оптимізаційної задачі для періоду часу, рівного одному року, дає значенням $tg\varphi$=0,35. Для періоду часу, рівного двом рокам, оптимально виконувати компенсацію до $tg\varphi$=0,27, а для періодів часу 3 роки і вище оптимально виконувати КРМ до значення коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$= 0,10. З огляду на, що термін служби КУ становить від 6 до 15 років, то стає очевидним, що навіть при настільки високій питомій вартості КУ і низькому тарифі на електроенергію, глибока компенсація до значення $tg\varphi$ = 0,10 оптимальна.

Для порівняння витрати на оплату за втрачену електроенергію за 1, 2, 3 і 4 роки при незмінному тарифі зведені в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 - Витрати на оплату втрат електроенергії до і після компенсації реактивної потужності

Глибина компенсації	Вартість втрат електроенергії (З) при тарифі 2,34 грн. / кВт-год, млн.грн.			
	За 1 рік	За 2 рік	За 3 рік	За 4 рік
Без компенсації	1,10	2,21	3,13	4,42
З компенсацією	0,87	1,58	2,01	2,68

З таблиці 3.9 видно, що виконуючи компенсацію реактивної потужності до значення рівного 0,10, зменшуються витрати на оплату втрат електроенергії на 39%. Тариф на електроенергію 2,34 грн. / кВт-рік - це один з найнижчих

тарифів по країні. У більшості регіонів він коливається від 3,5 грн. / кВт-рік до 4 руб / кВт- рік.

Виконані аналогічні розрахунки для тарифів за електроенергію, рівні 3,5 грн. / кВт- рік і 4 грн. / кВгод- рік, наведені на рис. 3.14.

Результати показують, що при вирішенні завдання КРМ, оптимально виконувати глибоку компенсацію до значення коефіцієнта реактивної потужності.

Виконано розрахунок оптимізаційної задачі (3.9) при обмеженнях значення коефіцієнта реактивної потужності до 0,35 (3.37),

Тариф на електроенергію 3,5 грн./кВт г			
1 рік	2 роки	3 роки	4 роки
CU 20 0.0 CU 40.0 CU 140.0 CU 8 0.0 CU 25 0.0 CU 36 0.0 CU 310.0 CU 510.0 CU 45 0.0 CU 6 1 30.2997 CU 74 22.7745 CU 75 0.0 CU 76 56.8088 CU 89 0.0 tan 0.429636 dP 47.8562 kW dQ 17.8324 k'*r Qx 109.883 kVar cost dP by period 1.43226e406 grn costQx 759563 grn total cost 1.63445e+06 grn payback period 0.920705	CU 20 0.0 CU 40.0 CU 148.22654 CU 8 19.9013 CU 25 0.0 CU 36 10.9833 CU310.0 CU 51 12.9629 CU 45 17.2368 CU61 106.055 CU 74 58.9935 CU 75 47.7739 CU 76 103.291 CU 89 23.4591 tan 0.100084 dP 33.4915 kW dQ 21.9391 kVar Qx 413.393 kVar cost dP by period 2.0047e+06 grn costQx 761563 rub total cost 2.76627e+06 grn payback period 1.17252	CU 200.0 CU 40.0 CU 143.21004 CU 8 23.8815 CU 250.0 CU36Q.0 CU 310.0 CU 51 12.9629 CU 45 16.6423 CU61 107.943 CU 7461.0098 CU 75 50.3003 CU 76 108.142 CU 89 24.3461 tan 0.100016 dP 33.4976 kW dQ 21.9678 kVar Qx 413.942 kVar cost dP by penod 3.0076e+06 rub costQx 761654 rub total cost 3.76926e+06 grn payback penod 1.17299	CU 20 3.169 CU 40.0 CU 148.22664 CU 3 23.8649 CU 25 0.0 CU 36 6.63864 CU310.0 CU 51 12.9628 CU 45 13.1441 CU 61 104.235 CU 74 58.4662 CU 75 46.8755 CU 76 108.723 CU 39 22.6527 tan 0.100021 dP 33.4996 kW dQ 21.9656 kVar Qx 413.964 kVar cost dP by penod 4.01037e+06 rub costQx 761694 rub toy cost 4.772Q7e+06 grn payback period 1.17316
Тариф на електроенергію 4,0 грн./кВт-год			
CU 20 8.16503 CU 40.546324 CU 140.0 CU 3 5.93232 CU 25 0.0 CU 36 0.0 CU 310.0 CU 510.0 CU 45 0.0 CU 6162.6102 CU 74 38.192 CU 75 0.0 CU 76 78.0524 CU 89 0.0 tan 0.341053 dP 43.1758 kW dQ 19.6036 kVar Qx 193.5 kVar cost dP by period 1.47679e+06 grn cost Qx 356040 grn total cost 1.33233e+06 grn payback period 0.866158	CU 20 0.0 CU 40.0 CU 148.22656 CU 3 20.6285 CU 25 0.0 CU 36 0.0 CU310.0 CU 51 12.9629 CU 45 17.5935 CU61 107.861 CU 7463 CU 75 49.0163 CU 76 108.615 CU 89 26.0481 tan 0.100003 dP 33.4973 kW dQ 21.9658 kVar Qx 413.952 kVar cost dP by period 2.29148e+06 grn costQx 761672 grn total cost 3.05315e+06 grn payback period 1.02637	CU 20 0.0 CU 40.0 CU 148.22656 CU 3 213.7771 CU 250.0 CU 36 7.82111 CU 310.0 CU 51 12.9629 CU 45 15.4546 CU 61 108.023 CU 7463 CU 7546.2657 CU 76 103.537 CU 39 22.7591 tan 0.100099 dP 33.4933 kW dQ 21.9453 kVar Qx 413.876 kVar cost dP by period 3.43682e+06 grn cost Qx 761532 grn total cost 4.19335e+96 grn payback period 1.026	CU 20 8.169 CU 40.0 CU 148.22664 CU 3 23.865 CU 25 0.0 CU 36 10.9333 CU 310.0 CU 51 12.9628 CU 45 11.3302 CUol 104.749 CU 74 59.1206 CU 75 41.6105 CU 76 113.133 CU 39 19.7706 tan 0.100031 dP 33.5033 kW dQ 21.9676 kVar Qx 413.97 kVar cost dP by period 4.58454e+06 grn cost Qx 761705 grn toy cost 5.34624e+06 grn payback period 1.02696

Рис.3.14. - Екранна форма програми розрахунку оптимізаційної завдання (3.9) для 1, 2, 3 і 4 років при різних тарифах за електроенергію

Для порівняння результати зведені в таблицю 3.10.

При компенсації реактивної потужності до значення $tg\varphi = 0{,}35$, втрати активної потужності знижуються на 21%, а при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}10$, втрати зменшуються на 39%, але при цьому необхідно збільшити потужність компенсуючих пристроїв в 2 рази.

Таблиця 3.10 - Результати рішення оптимізаційної задачі (3.9) для різної глибини компенсації

Глибина компенсації	Порівняльні параметри			
	ΔP, кВт	Витрати на оплату втрат, млн. грн.	Q_K, кВАр	Витрати на КУ, тис. грн.
Без компенсації	55,19	1,10	-	-
$tg\varphi = 0{,}35$	43,51	0,87	185,15	340,67
$tg\varphi = 0{,}10$	33,50	0,67	413,96	761,64

Відомо, що для установки компенсуючих пристроїв необхідні додаткові площі. Витрати на монтажні роботи будуть практично однакові, як для установки компенсуючих пристроїв потужністю 185 кВАр, так і для пристроїв, що компенсують потужність 415 кВАр, тоді стає очевидним, що, вирішуючи питання компенсації реактивної потужності за допомогою конденсаторних батарей, слід виконувати глибоку компенсацію реактивної потужності [125].

Підприємство № 1 характеризується високою протяжністю кабельних ліній. Визначимо оптимальність глибокої компенсації при довжині ліній вдвічі менше.

Виконаємо розрахунок для значень c_Q, рівних 400 грн./ кВАр, 500 грн. / кВАр і 1840 грн. / кВАр. Приймемо тариф на електроенергію 3 грн./кВт-год.

При зменшенні довжини кабельних ліній втрати активної потужності зменшилися до значення $\Delta P = 18{,}17$ кВт, значення коефіцієнта реактивної потужності збільшилася до $tg\varphi = 0{,}56$, при цьому раціональними коефіцієнтами реактивної потужності будуть наступні значення:

- при c_Q = 400 грн. / кВАр до $tg\varphi$ = 0,10;

- при c_Q = 550 грн. / кВАр до $tg\varphi$ = 0,17;

- при c_Q = 1840 грн. / кВАр до $tg\varphi$ = 0,51.

Експеримент показує, що глибока компенсація оптимальна і не при настільки протяжних лініях.

Характерним значенням для більшості промислових підприємств час максимальних втрат для електричної мережі з тризмінним графіком розраховують за умови, що річне використання максимального навантаження $T_м$ = 6000 год, тоді відповідно до формули (3.5) τ = 4592 год. Проведемо розрахунок для запропонованої схеми (рисунок 3.2) при наступних значеннях:

- τ = 4592 год;

- довжина ліній на 20% менше;

- тарифи на електричну енергію дорівнює 2,34 грн. / кВт-год;

- питома вартість конденсаторних установок c_Q = 1840 грн. / кВАр.

При таких параметрах довжин кабельних ліній коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi$ = 0,55, а втрати активної потужності складають ΔP = 40,1 кВт.

При вирішенні даного завдання виходять такі значення:
τ = 0,10; - ΔP = 27,68 кВт; сумарна потужність компенсуючих пристроїв - 408,52 кВАр; термін окупності 5,6 років.

Даний експеримент показує, що глибока компенсація дозволяє зменшити втрати на 31%.

При розрахунку втрат в роботі враховувалося тільки опір кабельних ліній, без урахування температурного коефіцієнта збільшення опору матеріалу при його нагріванні, обумовленого проходженням струму навантаження, не враховувався опір контактних з'єднань і комутаційних апаратів.

В роботі [1261 показано, що врахування цих параметрів в мережах низької напруги збільшує значення втрат потужності в середньому в 8-9 разів, а в лініях з електродвигунами, де застосовуються магнітні пускачі, приблизно в 14 разів, тобто опір контактних з'єднань і апаратів можна порівняти з опором

лінії. З огляду на цю обставину, можна припустити, що фактичне значення втрат активної потужності на підприємстві значно більше, отже, глибока компенсація реактивної потужності є одним із значущих заходів підвищення енергоефективності електрообладнання систем електропостачання низької напруги.

3.8. Оптимізація реактивної потужності для підприємства № 2

Схема електропостачання даної підстанції підприємства № 2 наведена на рис. 3.15.

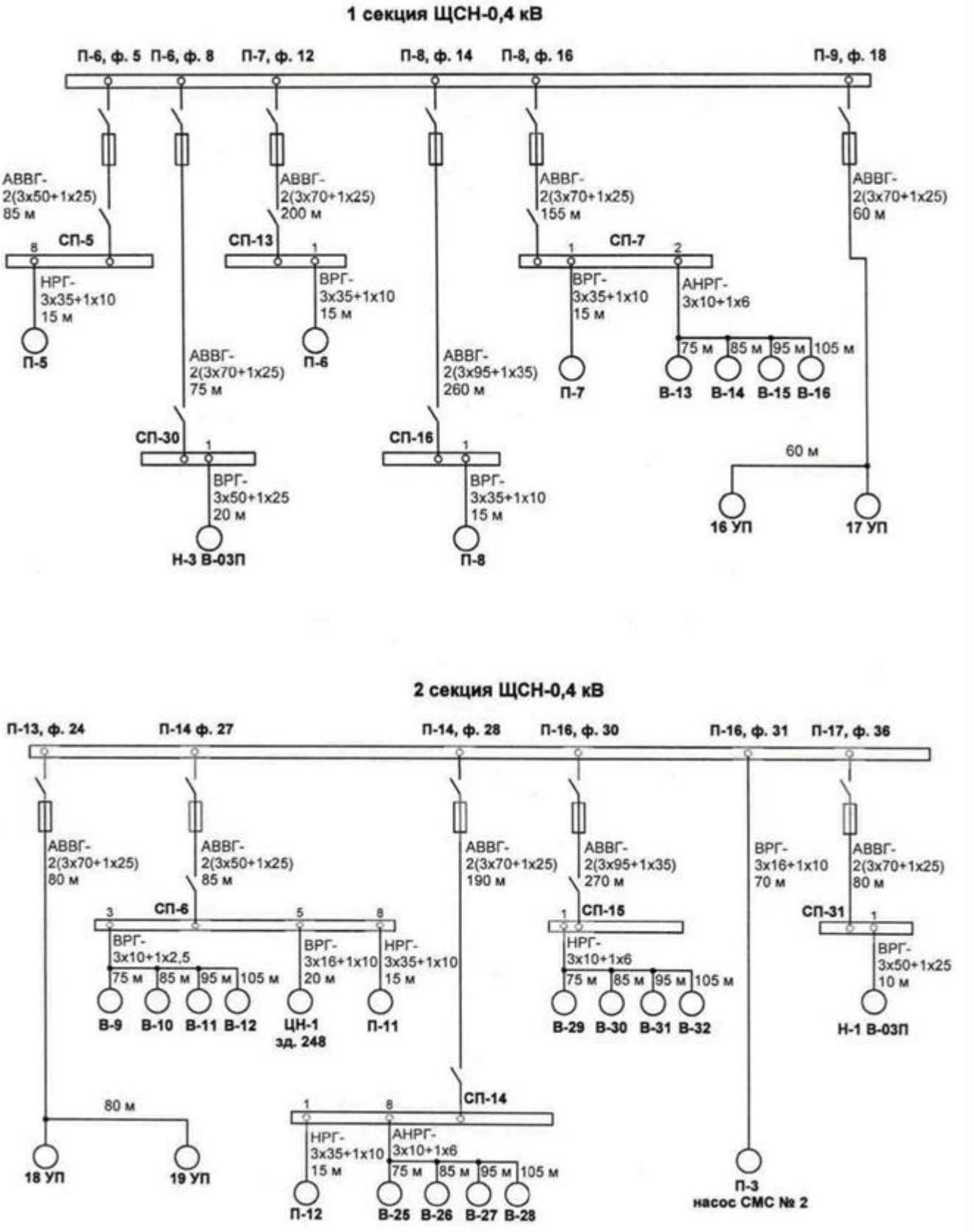


Рис. 3.15. - Схема електропостачання підстанції підприємства № 2

Відмінною особливістю електропостачання споживачів цієї підстанції є та обставина, що частина асинхронних електродвигунів оснащена частотно-регульованими перетворювачами, тому ці споживачі в схемі електропостачання не розглядалися.

Результати розрахунку усталеного режиму до оптимізації показані в табл. 3.11.

Таблиця 3.11- Значення параметрів схеми підприємства № 2

Номер секції N.	$tg\varphi$	Втрати електричної енергії в кабельних лініях за 1 рік,	Щорічна вартість втрат, тис. грн.
1 секція	0,57	4,38	93,45
2 секція	0,62	3,25	69,31

Результати рішення оптимізаційної задачі (3.9) при збільшенні ступеню компенсації реактивної потужності до значення $tg\varphi = 0{,}10$ на підприємстві № 2 показані на рис. 3.16.

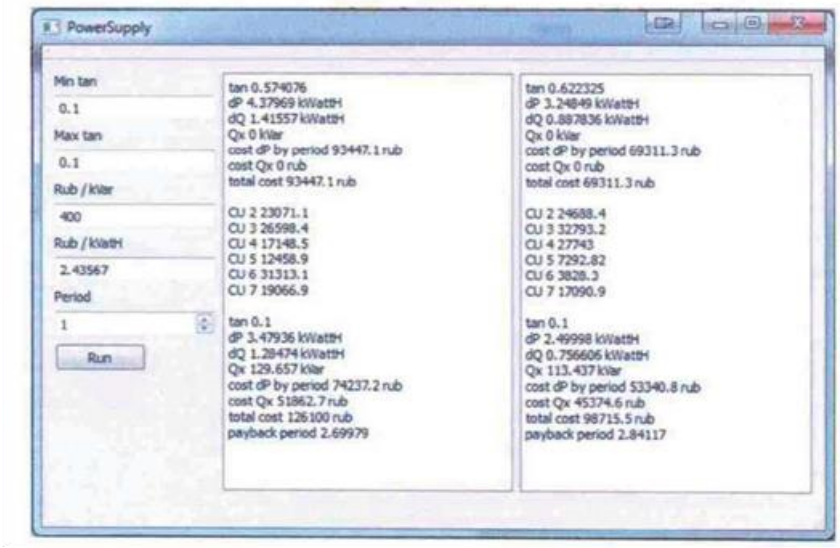


Рис. 3.16. - Екранна форма програми розрахунку значення параметрів розрахункової схеми підприємства № 2 до оптимізації і після оптимізації до значення $tg\varphi = 0{,}10$

Порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що при компенсації реактивної потужності до значення $tg\varphi \geq 0{,}35$, знижуються втрати електричної

енергії на 14,78%, а при компенсації до значення $tg\varphi \geq 0{,}10$ - на 22,27%. Глибока компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити втрати на 7,42%, при наступних строках окупності:

- для нерегульованих компенсуючих пристроїв - 2,7 року;

- для регульованих пристроїв, що компенсують - 3,6 року.

На даному підприємстві отримані результати по глибокій компенсації для даної підстанції були впроваджені..

3.9. Оптимізація реактивної потужності для міської електричної мережі

Для вирішення оптимізаційної задачі і аналізу глибокої компенсації був обраний фрагмент районної міської електричної мережі, схема якого наведена на рис. 3.17. Електрична мережа складається з 36 вузлів і 48 гілок. Всі розрахунки виконувалися на рівні напруги 10 кВ.

Максимальне значення $tg\varphi$ для мереж 1 - 20 кВ обмежується величиною 0,4 [69], як було зазначено вище, в науковій літературі, з точки зору оптимальності, значення цієї величини не має обґрунтування, тому при дослідженні верхнє значення коефіцієнта реактивної потужності обмежувалася величиною рівній 0,6.

Слід зазначити, що для міських електричних мереж серед споживачів електроенергії частка потужних трифазних асинхронних двигунів мала в порівнянні з промисловими підприємствами, тому нижнє обмеження *tg* (р встановлено рівним нулю. Таким чином, необхідно вирішити оптимізаційних задач (3.9), в якій обмеження по коефіцієнту реактивної потужності $0 \leq tg\varphi \leq 0{,}6.$

Для вирішення поставленого завдання розрахунок усталеного режиму виконується за допомогою програми RasterWin.

Потокорозподіл в програмі RasterWin для вирішення системи нелінійних рівнянь, якими описується сталий режим [117], застосовується метод Ньютона.

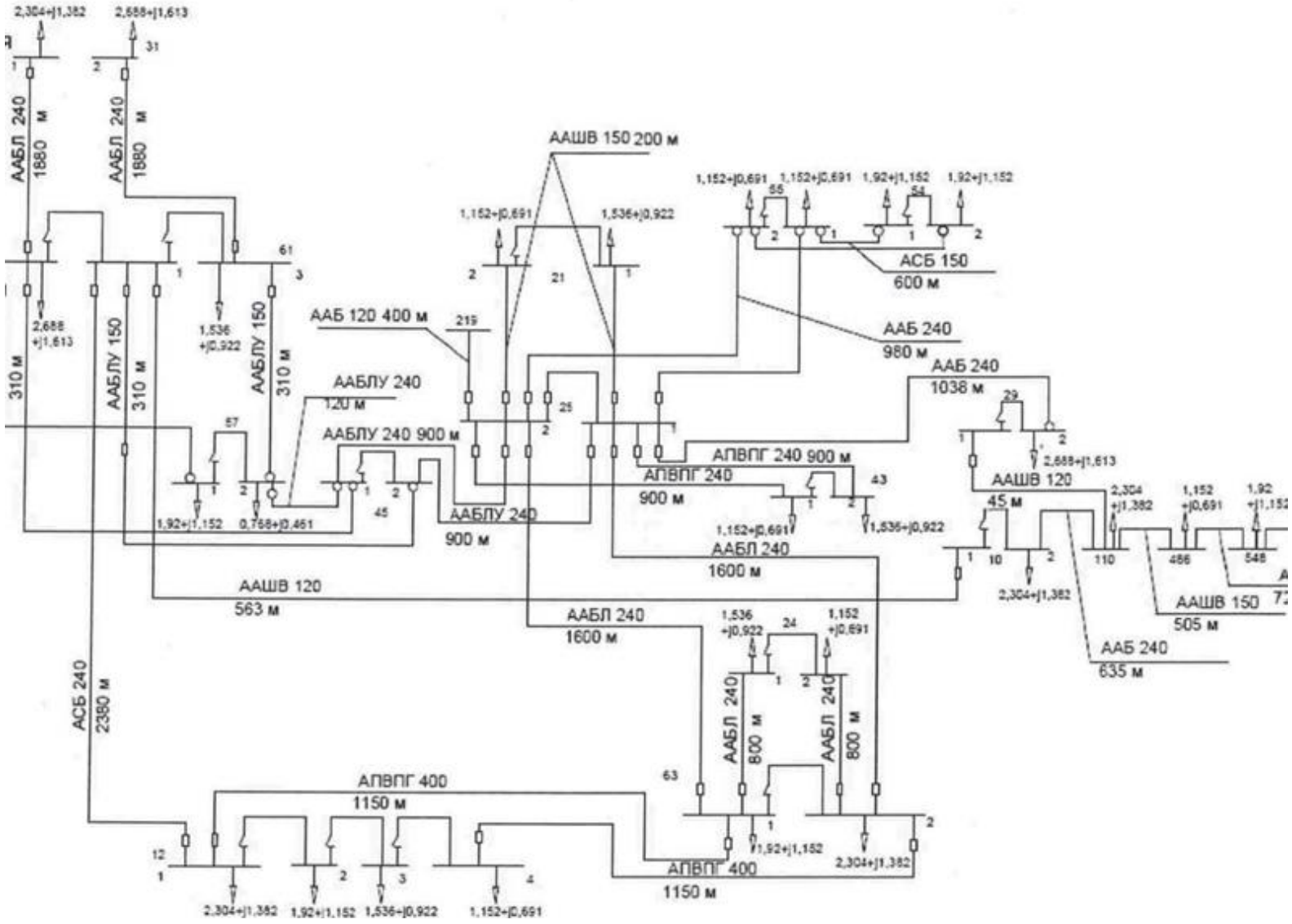


Рис 3.17. - Фрагмент електричної розподільної мережі району міста

Нелінійність системи рівнянь полягає в нелінійності задавання джерел струму (навантажень споживачів, які задаються статичною характеристикою або постійною потужністю, генераторів із заданою потужністю).

Метод Ньютона базується на лінеаризації системи рівнянь, тобто на кожній ітерації шляхом розкладання функцій системи в ряд Тейлора і відкидання членів розкладання порядку вище першого, відбувається послідовна заміна нелінійної системи рівнянь на деяку лінійну. Дія цього методу наведено в [33] для вирішення рівняння, записаного в матричної формі

$$W(X)=0 \qquad (3.39)$$

де W, X – вектор-функція і вектор змінних відповідно. Ітераційна формула методу Ньютона

$$W\left(x^{(k)}\right)+\frac{\partial W\left(X^{(k)}\right)}{\partial X}\Delta X^{(k)}=0 \qquad (3.40)$$

де $\frac{\partial W}{\partial X}=\left\{\frac{\partial W_i}{\partial X_j}, i, j=1,...N\right\}$ - квадратна порядку N матриця приватних похідних - матриця Якобі: $\Delta X^{(k)}=X^{(k+1)}-X^{(k)}$.

Вираз (3.40) являє собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\frac{\partial W\left(X^{(k)}\right)}{\partial X}\Delta X^{(k)}=-W\left(x^{(k)}\right), \qquad (3.41)$$

з невідомими $\Delta X^{(k)}$, яке існує і єдино за умови, що матриця коефіцієнтів (матриця Якобі) не дуже, тобто її визначник (якобіан) не дорівнює нулю.

Таким чином, рішення системи нелінійних рівнянь методом Ньютона полягає в багаторазовому рішенні (в ітераційне циклі) систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Параметри опорів ліній електричної мережі, наведеної на рис. 3.23, визначаються на підставі заданих марок кабелів і їх довжин. Погонні параметри для ліній визначалися за довідником [127]. Розрахунки визначення опорів ліній наведені в додатку І.

Параметри навантажувальних вузлів наведені в таблиці 3.12 .

В якості базисного вузла, сполученого з балансуючим, прийнятий вузол № 251. У вихідних даних вказано тип «база», в вузлі незмінна напруга, а значення потужностей визначається в ході розрахунку. Напруга прийнято рівним 10,6 кВ. Всім іншим вузлам присвоєно тип «нагр.», Вузли є навантажувальними і в них закріплена активна і реактивна потужності, а напруга підлягає визначенню в ході розрахунку. Результати розрахунку на програмному комплексі RasterWin наведені в додатку К.

Сумарні втрати активної потужності для мережі рівні 1,063 МВт.

Рішення завдання (3.9) виконано за допомогою алгоритму рою частинок, отримано оптимальний розподіл джерел реактивної потужності та величини реактивної потужності в обраних вузлах. Параметри, що застосовуються при оптимізації: вартість електроенергії приймається відповідно до тарифу в районі міста c_Q = 3,65 грн. / кВт-год; питома вартість регульованих конденсаторних установок для заданого класу напруги становить c_Q = 550 грн. /кВАр. Отримані значення зведені в таблицю 3.13.

Таблиця 3.12 - Параметри навантажувальних вузлів

Номер вузла	$P_н$, МВт	$Q_Н$, МВАр
1	2	3
101	0	0
102	2,304	1,382
133	2,304	1,382
110	2,304	1,382
211	1,536	0,922
212	1,152	0,691
219	0,896	0,538
431	1,152	0,691
432	1,536	0,922
241	1,536	0,922
242	1,152	0,691
451	0	0
452	0	0
571	1,92	1,152
572	0,768	0,461
486	1,152	0,691
251	0	0
252	0	0
548	1,92	1,152
551	1,152	0,691

Продовження таблиці 3.12

1	2	3
123	1,536	0,922
124	1,152	0,691
311	2,304	1,382
312	2,688	1,613
552	1,152	0,691
541	1,92	1,152
542	1,92	1,152
291	0	0
292	2,688	1,613
611	0	0
612	2,688	1,613
613	1,536	0.922
631	1,92	1,152
632	2,304	1,382
121	2,304	1,382
122	1,92	1,152

Таблиця 3.13 - Навантаження у вузлах і розподіл реактивної потужності до і після оптимізації

Номер вузла	$P_н$, МВт	$Q_н$, МВАр	$tg\varphi_{ест}$	Q, МВАр	$tg\varphi_{opt}$
133	2,304	1,382	0,59	1,38	0
241	1,536	0,922	0,6	0,92	0
242	1,152	0,691	0,59	0,69	0
571	1,92	1,152	0,6	1,15	0,01
572	0,768	0,461	0,6	0,46	0
541	1,92	1,152	0,6	0	0,6
542	1,92	1,152	0,6	0,22	0,5
291	0	0	0	0	0
121	2,304	1,382	0,59	1,38	0
311	2,304	1,382	0,59	1,38	0
312	2,688	1,613	0,6	1,61	0

Сумарні втрати активної потужності при цьому складуть ΔP = 0,872 МВт, необхідна величина компенсується потужності Q = 9,21 МВАр. Таким чином, втрати активної потужності зменшуються на 18%. У таблиці 3.13 наведено навантаженні при природному $tg\varphi_{ест}$, яке розраховано за формулою

$$tg\varphi_{ест} = \frac{Q_н}{P_н}, \qquad (3.42)$$

і коефіцієнт реактивної потужності навантаження після оптимізації $tg\varphi_{опт}$

$$tg\varphi_{опт} = \frac{Q_н - Q_{КУ}}{P_н}, \quad (3.43)$$

З таблиці 3.13 видно, що оптимальним рішенням КРМ практично у всіх вузлах є значення $tg\varphi$ рівне нулю.

Проведені розрахунки для різних значень тарифів на електричну енергію і різних цін конденсаторних установок. Результати зведені в таблицю 3.14.

Таблиця 3.14 - Розподіл реактивної потужності по вузлах при різних значеннях тарифу на електричну енергію і ціни конденсаторних установок

Номер вузла	C_Q=400 грн./кВ Ар, $c_р$=2,6 грн./кВт-год		C_Q=550 грн./кВАр, $C_р$=2,6 грн./кВт год		C_Q=400 грн./кВАр, Ср=3,2 грн./кВт-год	
	Q, МВАр	$tg\varphi_{опт}$	Q, МВАр	$tg\varphi_{опт}$	Q, МВАр	$tg\varphi_{опт}$
1	2	3	4	5	6	7
133	1,244	0,06	1,244	0,06	1,244	0,06
241	0,830	0,06	0,830	0,06	0,830	0,06
242	0,622	0,06	0,622	0,06	0,622	0,06
571	1,037	0,06	1,037	0,06	1,037	0,06
572	0,412	0,06	0,264	0,30	0,415	0,06
541	0	0,60	0	0,60	0	0,6
542	0,716	0,23	0	0,60	0,183	0,5
291	0	0	0	0	0	0
121	1,217	0,07	1,194	0,08	1,244	0,06
311	1,244	0,06	1,244	0,06	1,244	0,06
312	1,451	0,06	1,452	0,06	1,452	0,06
Сумарні втрати активної потужності, МВт						
	0,882		0,888		0,885	
Необхідна величина компенсується реактивної потужності, МВАр						
	8,773		7,886		8,269	

Результати рішення оптимізаційної задачі, наведені в таблиці 3.14, показують, що оптимально виконувати КРМ до значення рівного нулю.

Висновки до розділу 3

1. Виконано аналіз впливу зміни ступеню компенсації реактивної потужності для промислових підприємств для напруги 0,4 кВ та в міський електричної мережі для напруги 10 кВ на втрати активної потужності і рівні напруги.

2. На основі розрахункових досліджень встановлено, що при високій ступені компенсації РП (значення коефіцієнта реактивної потужності

знаходяться в межах від 0 до 0,1) на промислових підприємствах і в міських електричних мережах досягається енергоефективні рівні електроспоживання та електропостачання, що сприяє ефективно вирішувати проблему економічного зростання виробництва.

3. Встановлено, що ефективним способом визначення потужності КБ і місць їх встановлення є метод генетичних алгоритмів.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗБІЛЬШЕННЯ СТУПЕНЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ВИТРАТИ НА КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

4.1. Постановка задачі

Основним елементом електричної мережі є лінія електропередачі. Вибір перетину кабелю для електропостачання електроприймачів напругою 0,4 кВ здійснюється за значенням тривало допустимого струму з перевіркою вибраного перерізу на допустиму величину втрати напруги.

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_{ном}}, \qquad (4.1)$$

$$\Delta U = \frac{I \cdot pL_Л}{s_Л}, \qquad (4.2)$$

де P - активна потужність, кВт; Q - реактивна потужність, кВАр; $U_{ном}$ - номінальна напруга, кВ; $L_л$ - довжина ліній електропередачі, м; p - питомий опір провідника, Ом'мм^2 / м; $s_л$ - переріз проводу, мм^2.

Аналіз перетинів кабельних ліній схеми електропостачання підприємства № 1 показав, що вони завищені на одну або дві ступені від їх значень за довготривалим допустимим струмом для забезпечення нормованого рівня втрати напруги. Ця обставина вимагає збільшення механічної міцності конструкцій, що веде до подорожчання енергетичних об'єктів.

Зменшити довжину кабельних ЛЕП за рахунок оптимальної розстановки електрообладнання не можливо, оскільки вона залежить від встановленого технологічного обладнання.

У цьому розділі поставлена задача дослідити вплив ступеню компенсацію реактивної потужності в мережі електропостачання промислового підприємства на зниження втрат електроенергії з урахуванням мінімізації витрат на кабельну продукцію.

4.2. Математична модель об’єкта дослідження

Розглядалася схема однієї секції підстанції (ЩСН-1), що наведена в розділі 3 на рис. 3.2, за умови, що через кабельні лінії живлення першої секції

здійснюється електропостачання споживачів і другої секції (аварійний або ремонтний режими). На рис. 3.2 номери вузлів, що позначені колами, це електроприймачі, електропостачання яких в нормальному режимі здійснюється від першої секції. Номери вузлів, обведені прямокутником - це електроприймачі, електропостачання які в нормальному режимі здійснюється від другої секції підстанції.

У математичній моделі враховані:

- втрати активної потужності при передачі електричної енергії по кабельних лініях, мінімізація яких ($\Delta P(Q) \to \min$) здійснюється шляхом вибору оптимальних значень реактивної потужності КУ і місць їх установки;

- наведені витрати на пристрої, що компенсують ($З_q \to min$);

- зменшення перетинів ліній електропередачі (кабелів) за рахунок збільшення пропускної здатності при збільшенні ступню компенсації реактивної потужності ($s_K \to \min$).

$$\begin{cases} \Delta P(Q) \to \min \\ З_Q \to \min \\ s_K \to \min \end{cases},$$

де s_K – перетин кабельних ліній.

З поставленої мети зрозуміло, що дана задача є багатокритеріальною. Вирішення цього завдання дозволить забезпечити максимальний економічний ефект. Замінимо складові у формулі (4.3) фінансовими витратами:

- на оплату втрат активної потужності ΔP ($З_{\Delta P}$);

- на установку компенсувальних пристроїв ($З_Q$);

- на прокладку кабельних ліній ($З_{к\Sigma}$),

що дозволить перейти до однокритеріального завдання.

$$З = З_{\Delta P} + З_Q + З_{к\Sigma} \to \min \qquad (4.4)$$

В [128] показано, що при оцінці витрат на кабельні лінії електропередачі в складі капітальних вкладень у формулі (3.6), наведеній в розділі 3, може враховуватися тільки вартість кабелю, а в складі операційних витрат - тільки

вартість втрат електроенергії, оскільки «для суміжних значень перетинів не потрібно враховувати вартість будівництва кабельної лінії електропередачі (ЛЕП) і витрати на її експлуатацію, оскільки ці значення для суміжних значень перетинів однакові». У зв'язку з тим що, витрати на втрати електроенергії виділені окремим параметром оптимізації, тоді для кабельних ліній витрати на будівництво кабельних ліній:

$$З_{к\Sigma} = c_л L_{л,} \qquad (4.5)$$

де $c_л$ - ціна погонного метра кабельної продукції, яка залежить від перетину кабельної лінії, грн. / м,

$L_{л,}$ - довжина лінії, м.

Значення $c_л$ є дискретною величиною, яка залежить від перетину жили кабелю. В роботі питома ціна за один погонний метр кабельної лінії замінена питомої ціною за об'єм c_V. Розрахунок ціни за 1 мм^3 наведено в додатку Л. Таким чином, з (4.5) слід

$$З_{к\Sigma} = c_V F \cdot L_л \cdot 10^3, \qquad (4.6)$$

де c_V - питома ціна кабельної продукції, грн./ мм^3;

F - перетин струмоведучих частини лінії, мм^2; $L_Л$ - довжина лінії, м.

Розрахунок $З_{\Delta P}$ і $З_Q$ аналогічний, наведеному.

Завданням оптимізації при проектуванні є

$$З = c_p \tau \Delta P(\mathrm{Q}) + c_V F \cdot L_л \cdot 10^3 + 0{,}12 c_Q \sum_{i=1} Q_i \to \min, \quad (4.7)$$

при наступних обмеженнях

$$\begin{aligned} &0 < Q_i < Q_{\max i}, \quad i = 1,...,n \\ &Q_K = \{Q_1, Q_2, Q_3, ..., Q_n\} \\ &0{,}1 \le tg\varphi \le 0{,}6 \end{aligned} \qquad (4.8)$$

4.3. Результати рішення оптимізаційної задачі

Перед рішенням оптимізаційної задачі (4.7) необхідно виконати рішення задачі (3.9), розглянутої в розділі 3.На основі отриманих значень активної і реактивної потужностей у вузлах розраховувалися необхідні перетини жил

кабелів. Після цього визначалося значення $З_{\Delta P}$, оскільки при зміні перетинів змінюються втрати активної потужності. Таким чином, використовувалася багатоетапна процедура, яка полягала в наступному:

- 1-й етап - розрахунок струмів, напруги і втрат в мережі для аналізованого варіанту розстановки джерел реактивної потужності Q_K.

- 2-й етап - визначення допустимих перетинів і розрахунок витрат на кабельну продукцію $З_{K\Sigma}$;

- 3-й етап - перевірка вибраних перетинів кабельних ліній на допустиму втрату напруги;

- 4-й етап - перерахунок витрат на втрати активної потужності $З_{\Delta P}$ з урахуванням нових перетинів.

Вибір перетину виконаний за довго допустимому струму протікання в провіднику (табл. 1.3.6 і 1.3.7 Правил влаштування електроустановок [129]). Після вибору перетину виконувалася перевірка рівня напруги на затискачах електроприймачів. Допустиме відхилення напруги (± 10%) нормуються вимогами ГОСТ 32144-2013 [25]. Для перевірки використані формули, запропоновані в [130] для електричних мереж 0,4 кВ:

- для кабелів і проводів з мідними жилами

$$\Delta U = \frac{S \cdot L}{72 \cdot s_л}; \qquad (4.9)$$

- для кабелів і проводів з алюмінієвими жилами

$$\Delta U = \frac{S \cdot L}{46 \cdot s_л}; \qquad (4.10)$$

де, S - потужність в вузлах; L - довжина лінії; $s_л$ - перетин провідника.

Завдання вирішувалося для різних варіантів значень ціни за 1 кВАр і за 1 кВт-год. У всіх експериментах встановлено, що при вирішенні завдання (4.7), оптимальним значенням є коефіцієнт реактивної потужності, рівний $tg\varphi = 0{,}10$. У таблиці 4.1 наведені результати оптимізації за рівнянням (4.7) для найгіршого варіанту з точки зору окупності: висока питома ціна конденсаторної установки

і низький тариф на електроенергію. У нашому випадку c_Q = 1840 грн. / кВАр, c_p = 2,34 грн. / кВт-год.

Таблиця 4.1 - Значення результатів оптимізації завдання (4.7) для різних значень $tg\varphi$

Ступінь компенсації	Критерій завдання (4.7), (млн. грн.)	Втрати активної потужності ΔP, кВт	Сумарні витрати на кабельні лінії, млн. грн.	Сумарна потужність КУ, кВАр	$tg\varphi$
Без компенсації	5,17	55,19	4,07	0	0,54
$tg\varphi = 0,35$	4,61	44,63	3,38	185	0,35
$0,1 \le tg\varphi \le 0,6$	3,97	33,98	2,88	414	0,10

Таким чином, великий ступінь компенсації реактивної потужності дозволяє зменшити передану потужність, тим самим уникнути втрат напруги і не вдаватися до процедури збільшення перерізу проводів живлення [131].

У таблиці 4.2 наведені значення перетинів кабелів до компенсації і значення перетинів кабелів, отримані при різних ступнях компенсації РП.

Таблиця 4.2 - Перетини кабелів для різних значень $tg\varphi$

Номер початкового вузла - номер кінцевого вузла лінії	Перетин основної жили кабелю до компенсації	Перетин основної жили кабелю при компенсації до значення $tg\varphi = 0,35$	Перетин основної жили кабелю при компенсації до значення $tg\varphi = 0,1$
3-4	150	70	70
4-20	150	70	70
3-8	150	120	95
3-45	240	150	150
3-89	240	120	120
31-36	150	150	150
3-31	240	240	240
3-61	240	185	150
3-25	185	185	185
3-76	240	185	150
3-75	185	185	150
3-74	185	150	150

Грошові видатки на кабельну продукцію при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}35$ зменшуються на 17% (в грошовому обчисленні на 690 тис. грн.), а при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}10$ - на 29% (в грошовому обчисленні - на 1,19 млн. грн.). Великий ступінь компенсації РП дозволяє додатково економити 500 тис. грн. на кабельну продукцію для однієї секції підстанції в порівнянні з нормальною компенсацією [132].

Виконано розрахунок економії кольорового металу при глибокій компенсації реактивної потужності. Маса кольорового металу визначається як

$$m = s_л \cdot L \cdot p \cdot k_{ук} \cdot n, \qquad (4.11)$$

де, m - маса кольорового металу, кг; $s_л$ - перетин жили кабелю, мм^2;

L - довжина кабелю, м; ρ - густина матеріалу, для міді ρ = 8900 кг / м^3, для алюмінію ρ = 2700 кг/ м^3; $k_{ук}$ - коефіцієнт закручення кабелю; n - кількість жил.

За ГОСТ 15845-80 [133] коефіцієнт закручення це відношення довжини елемента скручування в скрученому кабельному виробі до довжини виробу. Відповідно до таблиці 7 СПБ 2194-2011 [134] $k_{ук}$ = 1,007.

Таблиця 4.3 - Вага кольорового металу для різних значень $tg\varphi$

Вид кольорового металу	Маса металу до компенсації, кг	Маса металу при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}35$, кг	Маса металу при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}10$, кг
Мідь	4461,57	2961,13	2794,255
Алюміній	1452,007	1252, 26	1144,48

При компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}35$ маса міді зменшується на 33,6%, маса алюмінію на 13,8%, а при компенсації до значення $tg\varphi = 0{,}10$ - міді на 37,4%, алюмінію на 21,2%.

4.4. Вплив довжини кабелю на термін окупності при високому ступені компенсації реактивної потужності

Виконано дослідження впливу довжини кабелю на термін окупності і глибину компенсації.

Очевидно, що термін окупності капіталовкладень залежить від тарифу на електроенергію c_p і від питомої вартості реактивної потужності компенсуючого пристрою c_Q. Для порівняння результатів проведені дослідження функцій:

$$g = f(L), \quad t = f(L) \qquad (4.12)$$

де, g – термін окупності, роки; L – довжина кабельної лінії, м;

t – значення $tg\varphi$

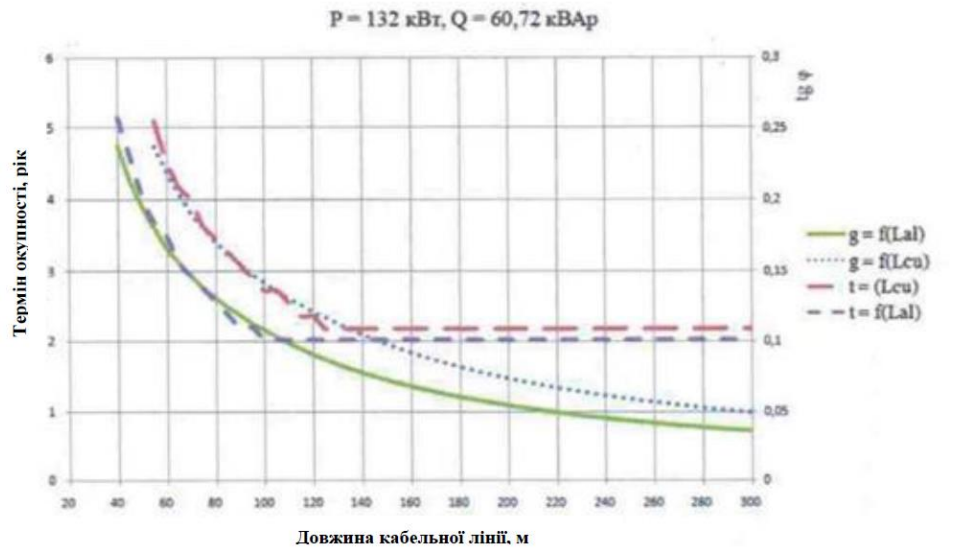
Зміна функцій (4.12) залежить від початкового значення коефіцієнту реактивної потужності. Оптимальні рішення, отримані з використанням генетичного алгоритму для електродвигуна з параметрами, наведеними в розділі 3 в таблиці 3.3, спочатку коефіцієнт реактивної потужності якого дорівнює $tg\varphi = 0,46$, зведені в таблицю 4.4. Значення тарифу на електроенергію взято c_p = 2,34 грн. / кВт-год.

Таблиця 4.4 - Оптимальні рішення для різних довжин кабельної лінії при початковому значенні $tg\varphi = 0,46$.

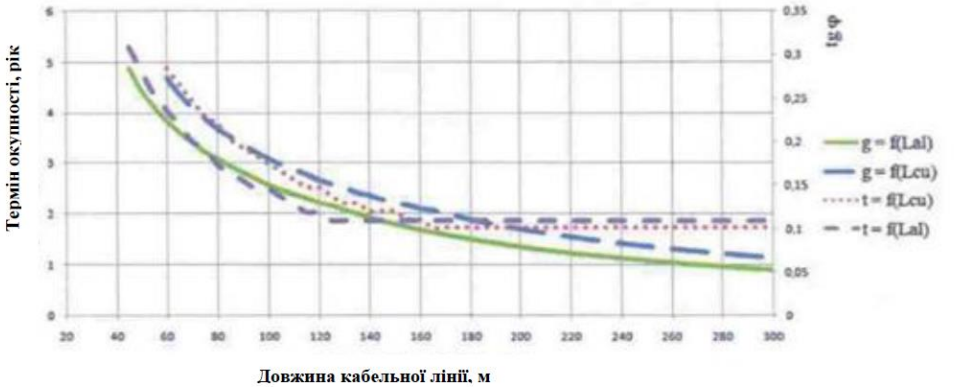
c_Q гр$_н$/кВ Ар	$L_Н$ м	tgφ при $L_Н$	Термін окупності при $L_Н$, рік	$L_Г$, м	tgφ при $L_Г$	Термін окупності при $L_Г$, рік
Для кабельної лінії з алюмінієвими жилами						
400	40	0,25	4,8	70	0,10	2,5
550	45	0,30	4,8	105	0,10	2,5
1840	35	0,39	4,7	300	0,15	2,2
Для кабельної лінії з мідними жилами						
400	55	0,25	4,7	120	0,10	2,4
550	60	0,29	4,7	135	0,10	2,4
1840	50	0,39	4,5	300	0,21	2,6

У таблиці 4.4 $L_н$ - початкова довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення компенсації реактивної потужності, а L_r - довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення великого ступеню компенсації до значення коефіцієнта реактивної потужності від 0,15 до 0,10. Жили живильного кабелю можуть бути алюмінієвими або мідними, тому розрахунки виконані для двох типів кабелів.

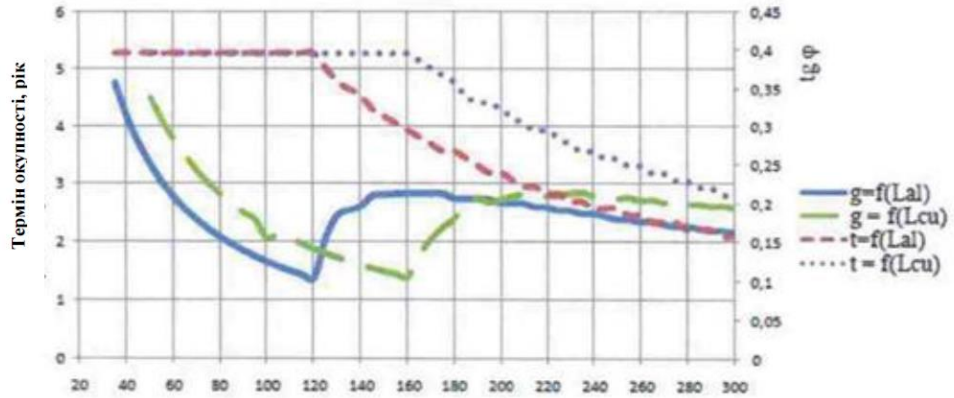
На рис. 4.2 наведені графіки зміни терміну окупності КУ від довжини кабельної лінії, за коштами якої проводиться електропостачання електродвигуна з коефіцієнтом реактивної потужності $tg\varphi$ = 0,46.



а) c_Q=400 грн./кВАр



б) c_Q=550 грн./кВАр



в) c_Q=1840 грн./кВАр

Рис. 4.2. Залежності терміну окупності від довжини лінії для різної глибини компенсації при початковому значенні $tg\varphi$ = 0,46.

Виконана аналогічний аналіз для електроприймача з більш високим коефіцієнтом реактивної потужності. Наприклад, це електродвигуни з меншою потужністю. Такі машини, як правило, мають коефіцієнт реактивної потужності від 0,5 до 0,6. Розрахунок виконаний для електродвигуна потужністю 45 кВт з параметрами, наведеними в розділі 3 в таблиці 3.4, при значенні тарифу на електроенергію c_p = 2,34 грн. / кВт-год і питомої вартості КУ c_Q = 400 грн. /кВАр, c_Q =550 грн./кВАр , c_Q =1840 грн./кВАр. Спочатку коефіцієнт реактивної потужності електроприймача був $tg\varphi = 0{,}51$. Оптимальні рішення, отримані з використанням генетичного алгоритму, зведені в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5. Оптимальні рішення для різних довжин кабельної лінії при початковому значенні $tg\varphi$ = 0,51

c_Q грн./кВАр	$L_Н$ м	tgφ при $L_Н$	Термін окупності при $L_Н$, рік	$L_Г$, м	tgφ при $L_Г$	Термін окупності при $L_Г$, рік
Для кабельної лінії з алюмінієвими жилами						
400	35	0,34	4,4	100	0,10	2,1
550	40	0,27	4,6	80	0,10	2,5
1840	20	0,34	4,6	220	0,10	1,4
Для кабельної лінії з мідними жилами						
400	40	0,34	4,7	ПО	0,10	2,4
550	45	0,29	4,9	90	0,10	2,7
1840	25	0,34	4,4	300	0,14	1,4

У таблиці 4.5 $L_н$ - початкова довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення компенсації реактивної потужності, а $L_г$ - довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення глибокої компенсації до значення коефіцієнта реактивної потужності рівного 0,10-0,14. Жилою живильного кабелю можуть бути алюмінієвими або мідними, тому розрахунки виконані для двох типів кабелів.

На рис. 4.3 наведені графік зміни терміну окупності КУ від довжини кабельної лінії, за допомогою якої проводиться електропостачання електродвигуна з коефіцієнтом реактивної потужності $tg\varphi = 0{,}51$.

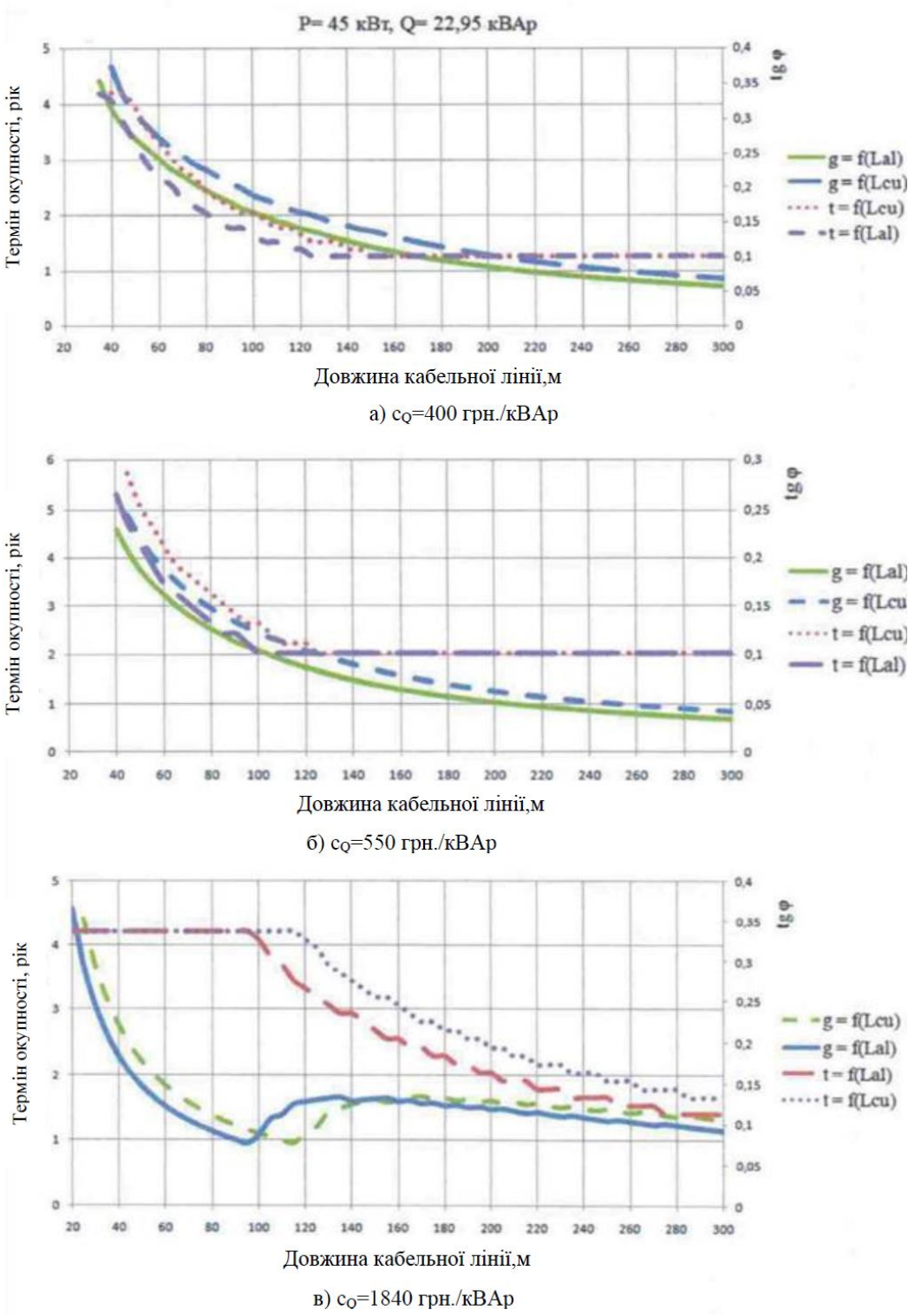


Рис. 4.3. - Графіки залежності терміну окупності від довжини лінії для різної глибини компенсації при початковому значенні $tg\varphi = 0{,}51$.

Порівнюючи значення таблиць 4.4 і 4.5, можна сказати, що чим вище початкове значення коефіцієнта реактивної потужності, тим менше довжина живильної лінії, при якій вигідно виконувати глибоку компенсацію.

Виконано аналогічні дослідження для споживача з початковим значенням $tg\varphi = 0{,}35$, $P = 100\ кВт$, $Q = 35 кВАр$. З розрахунку за допустимим тривалим струмом електропостачання такого споживача може здійснюватися кабелем з мідними жилами перерізом 70 мм^2 ~ або 95 мм^2 з алюмінієвими жилами. Дослідження проведені для випадків, які з точки зору окупності менш привабливі - низький тариф на електроенергію і висока питома ціна на компенсуючі установки: c_p = 2,34 грн. /кВт год, c_Q = 750 грн. / КВАр і (c_Q = 1840 грн/кВАр. на рис. 4.5 наведено графік зміни терміну окупності від довжини кабельної лінії.

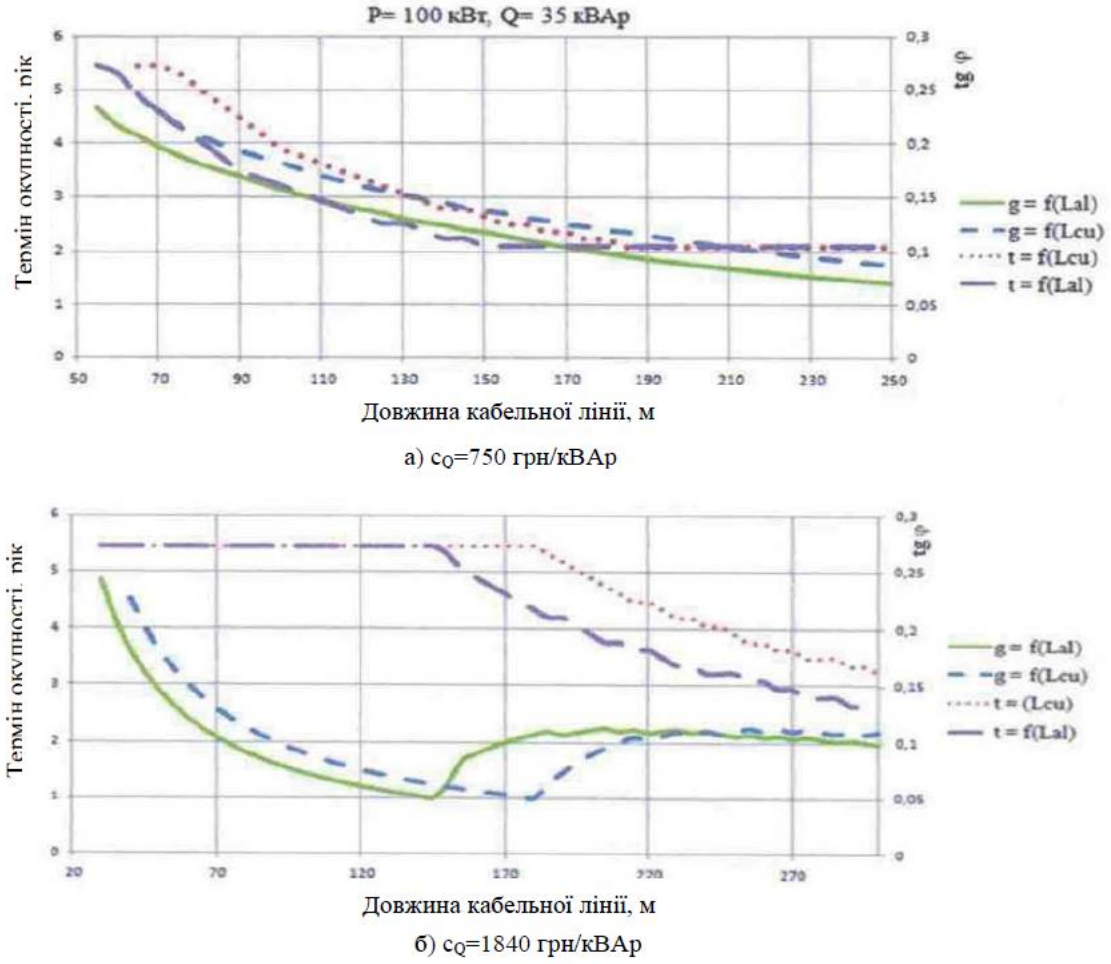


Рис. 4.4. - Графіки залежності терміну окупності від довжини лінії для різної глибини компенсації при початковому значенні $tg\varphi = 0{,}35$.

Оптимальні рішення, знайдені з використанням генетичного алгоритму, зведені в таблицю 4.6,

Таблиця 4.6 - Оптимальні рішення для різних довжин кабельної лінії при початковому значенні $tg\varphi = 0,35$.

c_O грн/кВАр	L_H м	tgφ при L_H	Термін окупності при L_H, рік	$L_Г$, м	tgφ при $L_Г$	Термін окупності при L_r, рік
Для кабельної лінії з алюмінієвими жилами						
750	55	0,27	4,7	105	0,10	3
1840	35	0,27	4,9	270	0,15	2,1
Для кабельної лінії з мідними жилами						
750	65	0,27	4,9	135	0,10	3
1840	40	0,27	4,5	325	0,15	2,2

У таблиці 4.6 $L_н$ - початкова довжина лінії, при якій знаходиться оптимальне рішення компенсації реактивної потужності, а $L_г$ - довжина лінії, при якій знаходиться оптимальне рішення глибокої компенсації до значення коефіцієнта реактивної потужності рівного 0,10-0,15.

Таким чином, при довжині лінії 50 м і більше, для ефективного використання електричної енергії, слід проводити компенсацію реактивної потужності. При довжині лінії живлення 100 м і більше, в залежності від вартості компенсуючого пристрою, слід проводити глибоку компенсацію реактивної потужності до значень від $tg\varphi = 0,15$ до $tg\varphi = 0,10$.

Висновки до розділу 4

1. В результаті досліджень, встановлено, шо проектні перетину ліній живлення не є оптимальними, оскільки забезпечували протікання додаткового індуктивного струму і збільшення падіння напруги від нього. При використанні принципів глибокої компенсації можна зменшити переріз кабелів і забезпечити відповідну економію кольорового металу.

2. Встановлено, що значення економічно-доцільного ступеню компенсації реактивної потужності залежить від потужності електроприймача (електродвигуна) і довжини лінії живлення. Показано, що при довжині кабельних ліній понад 100 м доцільно проводити компенсацію реактивної потужності до значення $tg\varphi = 0,1$.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволили отримати наступні результати:

1. Розроблено актуальне питання визначення ступеню компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових і міських об’єктів, що підвищує енергоефективність і якість функціонування цих систем. В результаті вирішення питання запропоновані і обґрунтовані нові значення коефіцієнтів реактивної потужності у електроприймачів на рівні 0-0,1.

2. Електричні мережі систем електропостачання підприємств і міст напругою 10 (6) - 0,4 кВ по своїй протяжності складають близько 50% всіх електричних розподільних мереж України.

Розкрито суперечності, що виникли в зв'язку зі скасуванням заохочувальних та штрафних надбавок за споживання реактивної потужності, які тепер не мають окремого вартісного вираження для електроспоживачів. Ці вартісні коефіцієнти враховані в тарифі навантажувальних втрат, що в свою чергу спрощує систему оплати, але не стимулює споживачів до зниження споживання реактивної потужності. Показано, що існуюча ступінь компенсації реактивної потужності у електроспоживачів за чинними нормативними документами не є достатньо обґрунтованою і не оптимальною, тому вимагає додаткового дослідження і обгрунтування.

3. У роботі обґрунтовано збільшення ступеню компенсацію реактивної потужності у електроприймача до значення $tg\varphi = 0 - 0{,}10$, замість рекомендованого нормативним документом $tg\varphi = 0{,}35 - 0{,}4$. В результаті проведених досліджень встановлено, що це дозволить досягти кращих енергоефективності та енергозбереження в системах електропостачання промислових підприємств і міст. При цьому, запропонований ступінь компенсації РП дозволяє використовувати економічно більш обґрунтовані перетини проводів і кабелів електричної мережі.

4. На прикладі систем електропостачання діючих конкретних промислових підприємств показано, що обрані при проектуванні СЕП перетини

проводів ліній живлення є завищеними, оскільки розраховані з урахуванням протікання додаткового індуктивного струму. При збільшенні ступню компенсації реактивної потужності ці додаткові фінансові витрати істотно знижуються, що створює умови для обґрунтованого і коректного зниження витрат на кольорові метали кабельної продукції.

5. При дослідженні впливу ступню компенсації РП для визначення оптимального джерела реактивної потужності використано еволюційні алгоритми, зокрема, генетичний алгоритм. Це обумовлено тим, що завдання компенсації реактивної потужності в системах електропостачання відрізняються дискретністю параметрів пристроїв, що компенсують РП і перетинів кабельних ліній. У зв'язку з цим, застосування традиційних градієнтних методів утруднено. Показані переваги генетичного алгоритму у швидкодії в порівнянні з методом Лагранжа.

6. У роботі виконано оптимальне розміщення джерел реактивної потужності в вузлах міської електричної мережі напругою 10 кВ, що дозволило знизити втрати активної потужності і покращити якість електропостачання міської інфраструктури. Дослідження показали, що енергоефективність цих заходів трохи нижче, ніж на промислових підприємствах, що пояснюється більш розподіленим навантаженням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги: дис. … кандидата техн. наук: 05.14.02 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». Київ. 2020. 271 с.

2. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.

3. Зорин В. В. Тисленко В. В. Системи електроснабжения общего назначения: учеб. для студ. высш. уч. зав. Чернигов: ЧГТУ, 2005. 341 с.

4. Лоскутов А. Б., Еремин О. И. Компенсация реактивной мощности. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Промышленная энергетика. 2006. №6. С. 39-41.

5. Говоров Ф. П., Перепеченный В. А., Говоров В. Ф. К вопросу о компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов. Енергетика та електрифікація. 2007. №7. С. 54-58.

6. Статья подготовлена редакцией бюллетеня «Энергосовет». Энергосбережение при компенсации реактивной мощности у потребителей. Энергосовет. 2010. № 3(8). С. 21-23.

7. Дорошенко А. И., Савранский Ю. А. Компенсация реактивной мощности городских электрических сетей 0,4 кВ. Енергетика та електрифікація. 2007. №12. С. 13-20.

8. Демов А. О., Демов О. Д., Войнаровський А. Ж., Паламарчук О. П. Особливості впровадження компенсувальних установок у електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах. Енергетика та електрифікація. 2006. №2. С. 12-15.

9. Буйний Р. А., Зорин В. В. Регулирование взаимоотношений между потребителями и электроснабжающей организацией в условиях рыночной экономики. Енергетика та електрифікація. 2007. №6. С. 52-54. 147

10. Кузьмин В. В., Кирисов И. Г., Малинин С. В. Анализ средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях Украины. Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. 2012. №5. С. 45-50.

11. Лазуренко А. П., Прохоренко Ю. В. Современные методы и устройства компенсации реактивной мощности в бытовых системах электропотребления. Вестник Национального технического университета «ХПИ». Харьков, 2011. Вып. 41. С. 83-87.

12. Соломчак О. В. Методика вибору та порівняння варіантів компенсації реактивної потужності. Енергетика та електрифікація. 2004. №9. С. 23-27.

13. Потребич А. А., Ткачев В. И., Коваленко Д. В., Катренко Г. Н. Особенности применения мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. Енергетика та електрифікація. 2008. №2. С. 33-35.

14. Готман В. И., Маркман Г. З., Маркман П. Г. Компенсация реактивной мощности. Задачи обследования системы компенсации реактивной мощности. Промышленная энергетика. 2006. №8. С. 50-55.

15. Вильданов Р. Г., Ионцева О. А., Исхаков Р. Р., Бикметов А. Г. Снижение потерь электроэнергии с помощью компенсации реактивной мощности. Современные проблемы науки и образования. 2015. №1(1). С. 25-33.

16. Некрасов С. А. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях на основе распределенной энергетики. Промышленная энергетика. 2013. № 4. С. 48-53.

17. Ершов С. В., Савицкий И. В. Разработка систем компенсации реактивной мощности в условиях городских электрических сетей. Известия ТулГУ. Технические науки. Тула, 2012. Вып. 12. Ч. 3. С. 37-42.

18. Солонина Н. Н., Суслов К. В., Солонина З. В. Новые технологии компенсации реактивной мощности. Вестник ИрГТУ. Иркутск, 2016. №5 (112). С. 135-143. 148

19. Зорин В. В., Буслова Н. В. Оптимизация конденсаторных батарей в распределительных сетях по условиям режима напряжения. Электрические сети и системы. 1971. №8. С. 62-69.

20. Зорин В. В., Экель П. Я. Методы дискретной оптимизации систем электроснабжения. Энергетика и транспорт. 1980. №5. С. 25-37.

21. Ching-Tzong Su, Cheng-Yi Lin, Ji-Jen Wong Optimal size and location of capacitors placed on a distribution system. Wseas transactions on power systems. 2008. No 4. Pp. 247-256.

22. Aleksander Kot, Wiesław Nowak, Waldemar Szpyra, Rafał Tarko Efficiency improvement of reactive power compensation in power distribution networks. Przeglad elektrotechniczny. 2013. No 6. Pp. 190-195.

23. Akash, Gaurav Shah, Himnay Pratap Singh, Avinas Kumar Chauhan Importance of reactive power for distributed generation. International journal of emerging technology and advanced engineering. 2014. No 1. Pp. 84-88.

24. Juan Dixon, Luis Moran, Jose Rodriguez, Ricardo Domke Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. Proceedings of the IEEE. 2005. No 12. Pp. 2144-2164.

25. Mekhamer S. F., El-Hawary M. E., Soliman S. A., Moustafa M. A., Mansour M. M. New heuristic strategies for reactive power compensation of radial distribution feeders. IEEE Transactions on power delivery. 2002. No 4. Pp. 1128-1135.

26. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев, 1999. 32 с.

27. Зорин В. В. Экономически обоснованные значения перетоков реактивной мощности. V Международная научно-техническая конференция «Эффективность и качество электроснабжения промпредприятий». Мариуполь, 2005. С. 263-266.

28. Правила улаштування електроустановок, видання третє перероблене та доповнене. Київ, Мінпаливенерго України, 2012, 736 с. 149

29. Зорин В. В., Буйный Р. А., Иванько Д. О. Мероприятия по повышению эффективности режимов действующих распределительных электрических сетей. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №2. С. 70-77.

30. Зорін В. В. Вирішення задач компенсації реактивної потужності методом не визначених множників Лагранжа. На правах рукопису.

31. Зорін В. В. Вирішення задач компенсації реактивної потужності методом покоординатного спуску. На правах рукопису.

32. Зорін В. В. Вирішення задач компенсації реактивної потужності методом динамічного програмування. На правах рукопису.

33. Костин В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. СПб: СЗТУ, 2003. 120 с.

34. Арзамасцев Д. А. Введение в многоцелевую оптимизацию энергосистем: учебное пособие. Свердловск: изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1984. 88 с.

35. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде. СПб: Физматлит, 2002. 176 с.

36. Подиновский В. В., Ногин Д. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с. 3

7. Гительсон С. М. Экономические решения при проектировании электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1971. 256 с.

38. Зорин В. В., Мацкевич Ю. М. Компенсация реактивной мощности в стояках высотных зданий. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. №1. С. 22-30.

39. Зорин В. В., Докийчук Н. А., Буйный Р. А., Перепеченый В. А. Модели и методы определения потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ высотных зданий при проектировании и эксплуатации. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2020. №1. С. 7-13.

40. ДБН В.2.5-23:2003 Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. Київ, Мінрегіонрозвитку та будівництва України, 150 2003, 131 с.

41. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.

42. Шишкин С. А. Использование конденсаторов для компенсации реактивной мощности коммунально-бытовых нагрузок. Электрик. 2007. №6. С. 30-33.

43. Гавриш О. А. Розроблення стартап-проекту: методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

Vorteile der Blindleistungskompensation im Überblick // [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.zvei.org/PublikationerrBlindleistung.pdf (Дата звернення 01.12.2014).

44. Семенов, С.А. Энергосервис: как достигается эффект / С.А.Семенов //Главный энергетик. - 2014. - № 11.-С. 31-33.

45. Промышленники переходят в энергетическое ополчение // Энергонадзор. - 2014. - № 9. - С. 8-11.

46. Железко, Ю.С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности / Ю.С.Железко - Материалы шестого научно-технического семинара «Нормирование и снижение потерь электрической энергии в электрических сетях - 2008» (сборник докладов). - М.: Диалог-электро, 2008, С. 12-15.

47. Компенсация реактивной мощности в сетях коммунально-бытовых потребителей // [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.compensation.ru/component/com_cmparticle/id, 156/view, article /#.^УКори5_BbhA (Дата звернення 10.03.2015).

48. Тихоненко, Ю.Ф. Энергоаудит. Поправки в закон «Об энергосбережении...» / Ю.Ф.Тихоненко // Електронний журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ» - 2014. — № 1 (32) январь-февраль. - С. 19-21 // [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.energoso-vet.ru/bul_stat.php?idd=443 (Дата звернення 10.05.2015).

49. Хоничев, Ю.В. Энергоаудит: проводить или не проводить? Энергетические обследования и энергоаудит. // [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.energosovet.ru/stat507.html (Дата звернення 21.07.2015).

50. Энергосбережение в промышленном секторе // Главный энергетик. - 2014. - № 10.-С. 11-17.

51. Третьякова, Е.С. Повышение эффективного использования компенсирующих устройств на промышленных предприятиях ядерной отрасли / Е.С.Третьякова // Технические науки: теория и практика: материалы международной заочной научной конференции (г. Чита, апрель 2012 г.). - Чита: Издательство Молодой ученый, 2012. - С. 87-89.

52. Третьякова, Е.С. Возможности повышения эффективности использования компенсирующих устройств на промышленных предприятиях ядер- ной отрасли / Е.С.Третьякова // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы V Всероссийской научно- технической конференции / Томский политехнический университет. - Изд-во Томского политехнического университета, 2012. - С. 164-165.

53. Третьякова, Е.С. Использование генетических алгоритмов для оптимизации реактивной мощности на промышленных предприятиях / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы II Всероссийской научно- технической конференции (г. Рубцовск, 23-24 ноября 2012 г.). - Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск, 2012 - С. 232-236.

54. О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд: [Федеральный закон от 05.04.2013 N 44-ФЗ: по состоянию на 15.09.2015] [Електронний ресурс] // КонсультантПлюс [Офіц.. сайт]. https://www.consultant.ru/document/-cons_doc_LAW_144624/ (дата звернення: 01.11.2015).

55. Нурбосынов, Д.Н. Оптимальная компенсация реактивной мощности в электрических комплексах нефтегазодобывающего предприятия/

Д.Н.Нурбосынов, Т.В.Табачникова, А.Р.Гарифуллина, С.И.Смирнова // Промышленная энергетика. - 2010. - № 2. - С. 40-44.

56. Мамедяров, О.С. К вопросу о выборе компенсирующих устройств в распределительных сетях / О.С.Мамедов, Н.Ф.Зарбиева // Промышленная энергетика. - 2009. - № 2. - С. 38-41.

57. Беркович, Е.И. Реактивная мощность как информационное понятие / Е.И.Беркович // Электричество. - 1996. - № 2. - С. 51-58.

58. Минин, Г.П. Реактивная мощность / Г.П.Минин. - Москва «Энергия», 1978. - 88 с.

59. Константинов, Б.А., Компенсация реактивной мощности / Б.А.Константинов, Г.З.Зайцев. - Ленинград «Энергия», 1976. - 104 с.

60. Глушков, В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / В.М.Глушков, В.П.Грибин. - Москва «Энергия», 1975. - 104 с.

61. Герасименко, А.А. Выбор компенсирующих устройств в распределительных сетях электроэнергетических систем / А. А.Герасименко, В.Б.Нешатаев // Электричество. - 2014. - № 4. - С. 4-16.

62. Волошин, А.А. Адаптивная система автоматического управления средствами компенсации реактивной мощности подстанции / А.А.Волошин // Электрические станции. - 2009. - № 4. - С. 59-65.

63. Хохлова, С.В. Оптимизация режимов электрической системы на основе матрицы узловых сопротивлений / С.В.Хохлова // Наука. Техника. Инновации: тезисы докладов региональной научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых (г. Новосибирск, 11-13 декабря 2001 г.). - НГТУ. - 2001. Часть 2.- 149 с.

64. Тульский, В.Н. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети / В.Н.Тульский, А.С.Ванин, А.Толба Мохамед // Электричество. - 2020. - № 6. - С. 16-21.

65. Ковалев, И.Н. Расчет компенсации реактивной мощности с учетом тяговых сетей/И.Н.Ковалев, И.Г.Анперов //Электричество.- 1991.- № 5. - С.9-14.

66. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях секторе // Промышленная энергетика. - 1991. - №9.-С. 51-55.

67. Железко, Ю.С. Изменение характеристик графиков реактивной мощности при установке компенсирующих устройств / Ю.С.Железко, А.В.Артемьев // Промышленная энергетика. - 1991. - № 9. - С. 35-39.

68. Про внесення змін до Порядку формування цін на універсальні послуги: [Постанова НАЦІОНАЛЬНОЇ КОМІСІЇ, ЩО ЗДІЙСНЮЄ ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ У СФЕРАХ ЕНЕРГЕТИКИ ТА КОМУНАЛЬНИХ ПОСЛУГ від 03.03.2020 № 547: станом на 01.09.2020] [Електронний ресурс] // Система ГАРАНТ [Офіц.. сайт], http:// https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0547874-20#Text (дата звернення: 14.01.2020).

69. Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання: [Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21 червня 2013 р. N 399:] [Електронний ресурс]//Система ГАРАНТ [Офіц. сайт]. http://demo.garant.rU/#/document /195516/paragraph/208231:0 (дата звернення: 14.01.2020).

70. Лопатников, Л.И. Экономико-математический словарь. Словарь современной экономической науки / Л.И.Лопатников. - Москва «ДЕЛО», 2003. - 520 с.

71. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю.С.Железко. - Москва «Энергоиздат», 1981. - 200 с., ил.

72. Карпенко, А.П. Популяционные алгоритмы глобальной оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов [Текст] / А.П. Карпенко // Приложение к журналу «Информационные технологии». - 2012. -№ 7. - С. 1- 32.

73. Скиена, С. Алгоритмы. Руководство по разработке [Текст] / Стивен

Скиена. - 2-е изд.: пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. - 720 с.: ил.

74. Land, A. H. An automatic method of solving discrete programming problems / A.H. Land, A. G. Doig // Econometrica, 1960. - 28 (3). - P. 497- 520.

75. Кухаренко, С.В. Решение задачи календарного планирования с использованием эвристических алгоритмов [Електронний ресурс] / С.В. Кухаренко, А.А. Балтовский // ААЭКС. - 2004. - № 1 (13) Информационно-управляющие комплексы и системы. — Режим доступу: http://aaecs.org/kuharenko-sv-baltovskii-aa-reshenie-zadachi kalendamogoplaniro-vaniya-s-ispolzovaniem-evristicheskih-algoritmov.html (дата звернення 21.01.2014).

76. Glover, F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence /F.Glover//Computers and Operations Research.- 1986.-13(5).-P.533-549.

77. Поиск с запретами. Дискретные задачи размещения [Електронний ресурс] // Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН Лаборатория «Математические модели принятия решений». - Режим доступу: http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp_tabu.html (дата звернення 20.01.2014).

78. Glover, F. Tabu search [Текст] / F. Glover, M. Laguna // Vol. 22. Boston: Kluwer academic publishers, 1997.

79. Столяр, А.А. Алгоритмы локального поиска для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами [Текст]: автореф. дис. канд. физ-мат. наук./ А.А Столяр // Ин-т Математики им. С.Л. Соболева СО РАН. - Новосибирск, 2004. - 23 с.

80. Pezzella, F. A Tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem [Текст] / F. Pezzella, E. Merelli // European Journal of Operational Research. - 2000. - №120. - P. 297-310.

81. Толстов, Г.П. Элементы математического анализа / Г.П.Толстов. - Том П. - М.: Изд-во Наука, 1966. - 464 с.

82. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J.H.

Holland // University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

83. Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in search, optimization & machine learning. Adisson Wesley, 1989.

84. Thrift, P. Fuzzy logic synthesis with genetic algorithms [Текст] / PThrift // Proceedings 4th. International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, 1991, 509-513.

85. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А.Гладков, В.В.Курейчик, В.М.Курейчик. - М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2010. - 366 с.

86. Исаев, С.А. Разработка и исследование генетических алгоритмов для принятия решений на основе многокритериальных нелинейных моделей: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Нижний Новгород, 2000.

87. Панченко, Т.В. Генетические алгоритмы / Т.В.Панченко. - Издательский дом «Астраханский университет», 2007. - 87 с.

88. Лекция 1. Введение. Основы генетических алгоритмов [Електроннийресурс] // ИНТУ ИТ [Офіц.. сайт].

http://www.intuit.ru/studies/courses/14227/1284/ (дата звернення 30.03.2016).

89. Тим Джонс, М. Программирование искусственного интеллекта в приложениях: пер. с англ. А.И.Осипова / М. Тим Джонс - М.: ДМК Пресс, 2004.-312 с.

90. Вороновский, Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. - Харьков: ОСНОВА, 1997. - 112 с.

91. Лукьянов, П.Д. Критерий остановки генетического алгоритма при решении задач оптимизации [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://conf.nsc.ru/flles/conferences/ym2012/fulltext/137477/139423/ (дата обращ-ения 08.03.2016).

92. Третьякова, Е.С. Применение генетических алгоритмов для оптимального размещения источников реактивной мощности на промышленных предприятиях / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2012. - № 2 - С. 329-331.

93. Tretyakova, Elena S. The calculation of the optimal placement of reactive power sources in industrial enterprises with the use of genetic algorithms / Vadim Z. Manusov, Elena S. Tretyakova // Young Scientist USA. Applied Science - P. 79-82.

94. Tretyakova, E.S. Optimization Compensating Devices in the Power Systems Using Population Algorithms / E.S Tretyakova, V.Z.Manusov, U. Bumtsend // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) p. 276-280.

95. Третьякова, Е.С. Компенсация реактивной мощности в сетях 0,4 кВ с использованием генетического алгоритма / Е.С.Третьякова // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени: материалы II международной научно-практической конференции. Часть 3 - Научная ассоциация ученых (НАУ) - Ежемесячный научный журнал. - 2014. - № 2 - С. 50-52.

96. Asrari, A. Optimal distribution network reconfiguration using dynamic fuzzy based genetic algorithm [Текст] / A.Asrari, S.Lotfifard // Innovations in Technology Conference (InnoTek), 2014 IEEE - On page(s): 1 - 7.

97. Свеженцова, О.В. Методы и алгоритмы обоснования рациональной конфигурации систем электроснабжения: Автореф. дис. к.т.н. - Иркутск, 2012.- 28 с.

98. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. - Москва «Энергоатмиздат», 1987. - 336 с.

99. Сарваров, А.С. Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Носова. - 2011. № 3. - С. 8-11.

100. Компенсация реактивных мощностей // [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://leg.co.ua/stati/podstancii/kompensaciya reaktivnyhmosch-nostey.html (Дата звернення 04.02.2020).

101. Красник, В.В. Управление электрохозяйством предприятий. Производственно-практическое пособие. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. - 152 с.

102. Воропай, Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы /Н.И.Воропай // Автоматизация и IT в энергетике. -2011.- №3(20). - с. 11-16

103. Карпов, Ф.Ф. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий / Ф.Ф.Карпов, Л.А.Солдаткина. - М.: Энергия, 1970.-224 с.

104. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В.А.Веников, Л.А.Жуков, И.И.Карташев, Ю.П.Рыжов. - М.: Энергия, 1975.-210 с.

105. Мукосеев, Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий / Ю.Л. Мукосеев. - М.: Энергия, 1973. - 584 с., ил.

106. Третьякова, Е.С. Оптимизация реактивной мощности на основе генетического алгоритма / В.З. Манусов, Е.С.Третьякова // Главный энергетик.- 2015.-№ 1 - С. 26-29.

107. Блок, В.М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов / В.М.Блок. - М.: Высшая школа, 1981.-304 с.

108. Железко, Ю.С. Научно-методические основы стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях: Авто-реф. диссертации по энергетике, 05.14.02 [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://tekhnosfera.com/nauchno-metodicheskie-osnovy-strategiisnizhe-niya- poter-i-povysheniya-kachestva-elektroenergii-v-elektricheskihsetyah#ixzz-4IXimvDKz (дата звернення 08.05.2014).

109. Tretyakova, Elena Genetically Adapted Particle Swarm Algorithms for Optimization the Reactive Power Sources Arrangement / Vadim Manusov, Pavel Matrenin, Viktor Sekaev, Elena Tretyakova // 2015 International Conference on Software, Multimedia and Communication Engineering, September 20-21, 2015, Hong Kong - Vol. 439 - 2015. - pp 218-222. ISBN: 978-1-60595-284-0.

110. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети / А.В.Лыкин. - Москва «Логов», 2008. - 254 с.

111. Электрические системы. Электрические сети: Учеб, для электроэнерг. спец, вузов / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.: Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. - 2-е изд., перераб и доп. - М.: шк., 1998. - 511с.

112. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J.Kennedy, R.Eberhart // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, vol. IV, P. 1942-1948.

113. Матренин, П.В. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта / П.В.Матренин, В.Г.Секаев // Программная инженерия. - 2013. - №12. - С. 39-45.

114. Matrenin P.V. Particle Swarm optimization with velocity restriction and evolutionary parameters selection for scheduling problem / P.V.Matrenin, V.G.Sekaev // In Proceedings of Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on, 2015, P.1-5.

115. Clerc, M. The particle swarm explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space / M.Clerc, J.Kennedy // IEEE Trans Evol Corn- put, 2002, 6(1), P. 58-73.

116. Третьякова, Е.С. Оптимизация размещения источников реактивной мощности с помощью алгоритма роя частиц с генетической адаптацией / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Промышленная энергетика. - 2016.-№ 8.-С. 34-40.

117. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов / В.И.Идельчик. Изд-во «Энергоатомиздат», Москва, 1989. - 592 с.

118. Pedersen, M., Chippereld, A. Simplifying Particle Swarm Optimization / M.Pedersen, A.Chippereld // Applied Soft Computing 2010, 10(2), P. 618- 628.

119. Третьякова, Е.С. Оптимизация распределения источников реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий с использованием роевых алгоритмов электроснабжения / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Электроэнергетика глазами молодежи: Труды VI международной молодежной научно-технической конференции, 9-13 ноября 2015, Иваново. - В 2 т. Т 1. - Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский

государственный энергетический университет им. В.И.Ленина», 2015. - С. 139-142.

120. Tretiakova, Elena Implementation of Population Algorithms to Minimize Power Losses and Cable Cross-Section in Power Systems / Vadim Manusov, Pavel V. Matrenin, Elena Tretiakova // International Journal of Electrical and Computer Engineering - Vol. 6, № 6. - pp. 2955-2961.

121. Кацман, Ф.М. Электрические машины автоматических систем: Учебник для техникумов / Ф.М. Кацман, Ф.М. Юферов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва «Высшая школа», 1979. - 261 с.: ил.

122. Кабышев, А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В.Кабышев. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. -234 с.

123. Капитонов, О.К. Влияние компенсации реактивной мощности на устойчивость работы мощного асинхронного двигателя / О.К.Капитонов // Вестник Чувашского университета. - 2012. - № 3 - С. 115-121.

124. Прайс-лист конденсаторных установок ООО «ЭнергоЗапад» [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://energozapad.ru /files/up-loads/-File/Pris_list_Ettalon2016.pdf (дата звернення 04.03.2020).

125. Третьякова, Е.С. Популяционные алгоритмы для оптимизации распределения реактивной мощности и выбора сечений кабеля в системах электроснабжения / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Электротехника. Электротехнология. Энергетика. ЭЭЭ-2015: Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. Часть 3. Секция «Энергетика» (г. Новосибирск, 9-12 июня 2015г.) - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015 - С. 67-70.

126. Грачева, Е.И. Влияние параметров электрооборудования на расчет эквивалентного сопротивления шинопровода при вычислении потерь электроэнергии / Е.И.Грачева, А.В.Шагидуллин, А.Н.Хаерова // Электрика. — 2014.-№8.-С. 2-5.

127. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: ЭНАС, 2012. - 376 с.

128. Фрайштетер, В.П. Выбор экономически обоснованного сечения проводов и жил кабелей линий электропередачи при проектировании / В.П.Фрайштетер, А.С.Мартьянов // Нефтяное хозяйство. - 2011. - № 4 - С. 117-121.

129. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. - 6-е изд., перераб. и доп. - М.:Энергоатомиздат, 1987. - 648 с.: ил.

130. Кнорринг, Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг, И.М. Фадин, В.Н. Сидоров. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербурское отд-ние, 1992. - 448 с.: ил.

131. Tretyakova, E. Population-based Algorithms for Optimization of the Reactive Power Distribution and Selection of the Cable Cross-section in the Power-Supply Systems / V. Manusov, E. Tretyakova, P. Matrenin // Applied Mechanics and Materials - Vol. 792 - 2015. - pp 230-236. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.230.

132. Третьякова, Е.С. Повышение энергоэффективности на промышленных предприятиях при выполнении глубокой компенсации реактивной мощности / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // ЭЛЕКТРО. - 2015. - № 5 — С. 2-7.

133. ГОСТ 15845-80 (СТ СЭВ 585-77) Изделия кабельные. Термины и определения: Государственный стандарт Союза ССР. — Введ. 01.07.81 // Издание Офіц.иальное. - М.: Госуд. комитет СССР по стандартам. — 28 с.

134. СПБ 2194-2011 Изделия кабельные. Расчет массы материалов. [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://www.kabels.ru7i/files/STB2194-2011_izdeliya_kabelnye_raschet_massy_materialov.pdf (дата звернення 22.12.2016).

135. Каплунов, Д.Р. Энергосбережение в процессах подземной добычи медных руд / Д.Р.Каплунов, В.А.Юков // Горный информационно-

аналитический бюллетень. - 2016. - № 4. С. 5-17.

136. Металлургия алюминия / Ю.В.Борисоглебский, Г.В.Галевский, Н.М.Кулагин, М.Я.Минцис, Г.А.Сиразутдинов. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. -438с.

137. Третьякова, Е.С. Глубокая компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения производства / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. - 2020.- № 4. - С. 33-38.

138. Щевьева, В.А. Финансирование инновационных проектов и экономическая оценка инвестиций: учеб, пособие / В.А.Щевьева. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 232 с.

139. Финансы для чайников. Финансово-инвестиционный блок Жданова Василия и Жданова Ивана [Електронний ресурс] // Режим доступу: http ://finzz.ru/srok-okupaemosti-investicij -raschet-v-excel .html#2 DPP (дата звернення 13.04.2020).

140. Хомов Электро [Електронний ресурс]//Режим доступу: http://khomovelectro.ru/pdf/kondensatomye-ustanovki-krm-0-4-ukm-58.pdf (дата звернення 19.04.2020).

141. Прайс-лист каталогу продукції ТОВ «ЕНЕРГОПРОМАВТОМАТИКА» на 28.12.2014 [Електронний ресурс]// Режим доступу: http://www.kipia.-energoportal.ru/info/katalog-produkcii-691.htme (дата звернення 28.12.2019).

142. Прайс-лист каталогу кабельної продукції Кабельный завод Энергопром [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://energoprom.net.ua/ru/production/price/ (дата звернення 15.10.2020).