

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Обґрунтування доцільності компенсації реактивної
потужності конденсаторними установками для
підвищення економічної ефективності
електропостачання
Explanation of the feasibility of reactive power
compensation by capacitor installations to improve the
economic efficiency of power supply»**

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр ГОРДІЄНКО
«__» _____2025 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Руслан ТЕЛЮТА
«__» _____2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький, 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2025 р.

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

Гордієнка Олександра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Обґрунтування доцільності компенсації реактивної потужності конденсаторними установками для підвищення економічної ефективності електропостачання

Explanation of the feasibility of reactive power compensation by capacitor installations to improve the economic efficiency of power supply

2. Керівник роботи Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 10.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування доцільності компенсації реактивної потужності конденсаторними установками для підвищення економічної ефективності електропостачання.

Завдання роботи: теоретичні засади компенсації реактивної потужності; засоби компенсації реактивної потужності; алгоритм та розрахунок оптимального режиму реактивної потужності; розрахунок оптимального режиму реактивних навантажень в системі електропостачання ВО «Вторчермет»; охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>10.10.25</i>	
2	<i>Теоретичні засади компенсації реактивної потужності</i>	<i>17.10.25</i>	
3	<i>Засоби компенсації реактивної потужності</i>	<i>24.10.25</i>	
4	<i>Алгоритм та розрахунок оптимального режиму реактивної потужності</i>	<i>07.11.25</i>	
5	<i>Розрахунок оптимального режиму реактивних навантажень в системі електропостачання ВО «Вторчермет»</i>	<i>21.11.25</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>28.11.25</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>05.12.25</i>	
8	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>	<i>10.12.25</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Телюта Р.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Гордієнко О.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гордієнко О.М. Обґрунтування доцільності компенсації реактивної потужності конденсаторними установками для підвищення економічної ефективності електропостачання.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування доцільності компенсації реактивної потужності конденсаторними установками для підвищення економічної ефективності електропостачання.

В роботі розглянуто поняття активної, реактивної та повної потужності, проаналізовано причини виникнення реактивних перетікань і їх вплив на техніко-економічні показники мережі: зростання струмів, збільшення втрат активної енергії, погіршення режимів напруги та завантаження трансформаторів і ліній. Наведено порівняльну характеристику засобів компенсації та обґрунтовано вибір конденсаторних установок як найбільш раціонального рішення за критерієм «вартість/ефект» для мереж 0,4–10 кВ. Особливу увагу приділено впливу напруги в точці приєднання на реактивну потужність, що генерується батареями конденсаторів, та пов'язаним ризикам недо- і перекомпенсації. Сформульовано задачу оптимізації параметрів компенсації за критерієм мінімуму приведених витрат із урахуванням капіталовкладень, вартості втрат та технічних обмежень; для оцінки капітальних витрат використано емпіричну залежність вартості конденсаторних установок від потужності. Виконано прикладні розрахунки та техніко-економічну оцінку ефективності впровадження конденсаторних установок, визначено очікуваний економічний ефект і термін окупності. Окремий розділ присвячено питанням охорони праці, пожежної безпеки та екологічно безпечної утилізації елементів конденсаторних установок.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, конденсаторні установок, режим напруги, оптимізація, цільова функція, капіталовкладення.

ABSTRACT

Hordiienko O.M. Explanation of the feasibility of reactive power compensation by capacitor installations to improve the economic efficiency of power supply

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Electrotechnical systems of electricity consumption», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The purpose of the qualification work is to substantiate the feasibility of compensation of reactive power by capacitor banks to increase the economic efficiency of electricity supply.

The work considers the concepts of active, reactive and apparent power, analyzes the causes of reactive flows and their impact on the technical and economic indicators of the network: increasing currents, increasing active energy losses, worsening voltage regimes and loading of transformers and lines. A comparative characteristic of compensation means is presented and the choice of capacitor banks as the most rational solution according to the criterion of "cost/effect" for 0.4–10 kV networks is justified. Particular attention is paid to the influence of the voltage at the connection point on the reactive power generated by capacitor banks and the associated risks of under- and overcompensation. The task of optimizing the compensation parameters according to the criterion of minimum reduced costs, taking into account capital investments, the cost of losses and technical limitations, is formulated; to estimate capital costs, the empirical dependence of the cost of capacitor banks on power is used. Applied calculations and a technical and economic assessment of the effectiveness of the implementation of condenser units have been performed, the expected economic effect and payback period have been determined. A separate section is devoted to issues of labor protection, fire safety and environmentally safe disposal of condenser unit elements.

Key words: reactive power compensation, capacitor banks, voltage regime, optimization, objective function, capital investment.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	10
1.1. Поняття активної, реактивної та повної потужності. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	10
1.2. Причини виникнення реактивної потужності у системах електропостачання	14
1.3. Вплив реактивної потужності на техніко-економічні показники системи електропостачання	17
1.4. Методи та засоби компенсації реактивної потужності в системах електропостачання	21
1.5. Нормативно-правові вимоги до режимів реактивної потужності та розрахунків за її перетікання	27
1.6. Висновки	30
РОЗДІЛ 2 ЗАСОБИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	32
2.1. Компенсація реактивної потужності батареями конденсаторів.....	32
2.2. Особливості компенсації реактивної потужності синхронними двигунами ...	35
2.3. Постановка задачі оптимізації	37
2.4. Функціональна залежність капіталовкладень в конденсаторні установки від їх потужності.....	40
2.5. Апроксимація вартості конденсаторних установок	42
2.6. Математичне формулювання задачі оптимізації	49
2.7. Аналіз властивостей функції цілі	50
2.8. Висновки	55
РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМ ТА РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	57
3.1. Алгоритм розрахунку оптимізації режиму реактивної потужності.....	57
3.2. Підготовка вихідних даних і проведення розрахунків з допомогою програми «ОптимUm»	62

	7
3.3. Особливості електропостачання ВО «Вторчермет».....	66
3.4. Вихідні дані для розрахунку	66
3.5. Економічна ефективність впровадження оптимального режиму реактивних навантажень в системі електропостачання ВО «Вторчермет».....	72
3.6. Висновки	74
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	75
4.1. Загальні положення та нормативна база охорони праці при експлуатації електроустановок	75
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час монтажу та експлуатації конденсаторних установок.....	78
4.3. Технічні заходи електробезпеки при використанні КУ (0,4–10 кВ).....	81
4.4. Забезпечення пожежної та вибухобезпеки у приміщеннях електрощитових з КУ.....	86
4.5. Охорона навколишнього середовища та утилізація елементів КУ.....	90
4.6. Висновки	92
ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	96
Додаток А Апроксимація вартості низьковольтних конденсаторних установок за лінійною залежністю.....	98
Додаток Б Апроксимація вартості високовольтних конденсаторних установок за емпіричною залежністю	101

ВСТУП

Підвищення енергоефективності систем електропостачання промислових підприємств є одним із пріоритетних напрямів сучасної електроенергетики, оскільки зростання тарифного навантаження та вимог до якості електроенергії підсилює потребу в оптимізації режимів роботи мереж. Значну частку електроспоживання формують індуктивні навантаження (електродвигуни, трансформатори, зварювальне обладнання), що обумовлює перетікання реактивної потужності, зниження коефіцієнта потужності, збільшення струмів і втрат, погіршення профілю напруги та перевантаження елементів мережі. У цих умовах компенсація реактивної потужності конденсаторними установками є практично доступним і економічно виправданим заходом, проте її результативність залежить від коректного вибору місця встановлення, потужності та режиму керування, а також від урахування впливу напруги на фактичну реактивну потужність, що генерується компенсуючим пристроєм.

Актуальність теми. Реактивні перетоки зумовлюють додаткові втрати активної електроенергії та обмежують пропускну здатність мережі, що призводить до зростання експлуатаційних витрат і потреби у передчасній модернізації електрогосподарства. Водночас нормативні вимоги щодо режимів реактивної потужності в точці приєднання та механізми розрахунків за перетікання реактивної електроенергії формують додаткові економічні стимули для підтримання прийняттого рівня $\cos\phi$. Тому актуальним є техніко-економічне обґрунтування компенсації реактивної потужності на основі оптимізаційного підходу, який враховує як втрати в мережі, так і капіталовкладення та режимний вплив напруги на величину реактивної потужності, що генерується батареями конденсаторів.

Мета і задачі дослідження. Обґрунтувати доцільність компенсації реактивної потужності конденсаторними установками для підвищення економічної ефективності електропостачання.

Задачі дослідження:

- розглянути методи та засоби компенсації реактивної потужності й обґрунтувати вибір конденсаторних установок як базового рішення;
- визначити залежність реактивної потужності, що генерується КУ, від напруги в точці приєднання та оцінити наслідки відхилень напруги для ефективності компенсації;
- сформулювати цільову функцію та математичну модель оптимізації параметрів компенсації з урахуванням приведених витрат і технічних обмежень;
- виконати розрахунки для вибраного об'єкта, визначити оптимальні параметри КУ та оцінити економічний ефект (зниження втрат/витрат, термін окупності);

Об'єкт дослідження – компенсація реактивної потужності конденсаторними установками в системах електропостачання.

Предмет дослідження – техніко-економічні закономірності та методи оптимізації компенсації реактивної потужності конденсаторними установками в системах електропостачання.

Науково-практична цінність роботи полягає у розробленні техніко-економічної моделі оптимальної компенсації реактивної потужності, яка мінімізує приведені витрати з урахуванням втрат в мережі, обмежень за напругою та залежності реактивної потужності, що видається батареями конденсаторів від фактичної напруги. Запропоновано емпіричну апроксимацію вартості конденсаторних установок та алгоритм пошуку оптимуму цільової функції. Результати застосовуються для вибору місця і потужності конденсаторних установок в мережах 0,4–10 кВ.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Поняття активної, реактивної та повної потужності.

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$

Електричні навантаження в системах змінного струму (насамперед промислові та комунально-побутові споживачі) у загальному випадку мають комплексний характер. Це означає, що струм у колі може бути зсунутий за фазою відносно напруги, а частина енергії протягом періоду не перетворюється незворотно в корисну роботу або тепло, а накопичується в електромагнітних полях і повертається назад у мережу. Для кількісного опису енергетичних процесів у таких колах застосовують поняття активної, реактивної та повної потужності.

Активна потужність P

Активна потужність – це середнє за період значення миттєвої потужності, яке характеризує незворотне перетворення електричної енергії в інші види (механічну роботу, тепло, світло тощо). Саме активна потужність визначає фактичне корисне енергоспоживання навантаження і є основою для комерційного обліку електроенергії.

Для синусоїдного режиму при діючих значеннях напруги U та струму I активна потужність визначається:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (1.1)$$

де φ – кут зсуву фаз між напругою та струмом.

Реактивна потужність Q

Реактивна потужність характеризує обмін енергією між джерелом та реактивними елементами кола (індуктивностями та ємностями). Вона не

виконує корисної роботи безпосередньо, але є необхідною для створення електромагнітних полів у ряді електротехнічних пристроїв, зокрема в асинхронних двигунах, трансформаторах, дроселях тощо.

В синусоїдному режимі реактивна потужність визначається:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi, \quad (1.2)$$

Знак Q залежить від характеру навантаження:

- для індуктивного навантаження (переважає індуктивність) струм відстає від напруги, ($Q > 0$);
- для ємнісного навантаження струм випереджає напругу, ($Q < 0$).

З погляду системи електропостачання реактивна потужність є критично важливою, оскільки її перетікання через мережеві елементи спричиняє додаткові струми, що веде до:

- збільшення втрат активної потужності у кабелях, повітряних лініях і трансформаторах;
- додаткових падінь напруги;
- зменшення пропускної здатності мережі та резерву трансформаторів за струмом;
- погіршення якості електроенергії та режимів роботи обладнання.

Отже, зменшення перетікань Q шляхом компенсації є одним із ключових резервів підвищення економічної ефективності електропостачання.

Повна потужність S

Повна потужність відображає сумарне навантаження на джерело та елементи мережі за струмом і визначається добутком діючих значень напруги та струму:

$$S = U \cdot I, \quad (1.3)$$

Повна потужність пов'язана з активною та реактивною через співвідношення:

$$S^2 = P^2 + Q^2. \quad (1.4)$$

Геометрично ці величини зручно інтерпретувати через трикутник потужностей (рис. 1.1), де P – горизонтальна складова, Q – вертикальна, а S – гіпотенуза. Кут φ між S і P відображає фазовий зсув між напругою і струмом, а також співвідношення активної та реактивної складових.

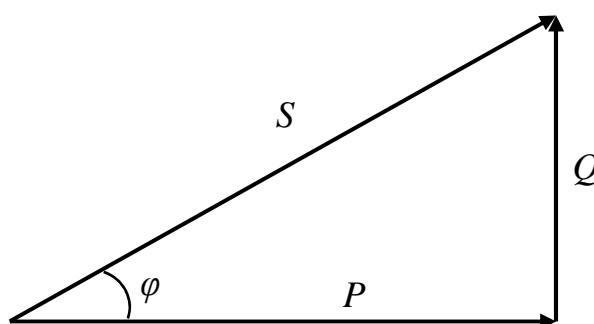


Рис. 1.1. Трикутник потужностей.

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ є одним із найважливіших показників енергоефективності електроспоживання. Він визначається як відношення активної потужності до повної:

$$\cos\varphi = P/S. \quad (1.5)$$

З формули випливає, що при фіксованій активній потужності P зменшення $\cos\varphi$ приводить до зростання повної потужності S і, відповідно, струму:

$$I = P/(U\cos\varphi). \quad (1.6)$$

Тобто, чим нижчий $\cos\varphi$, тим більші струми протікають у мережі при тому самому корисному навантаженні. Це прямо викликає:

- збільшення втрат електроенергії у провідниках і трансформаторах;
- необхідність застосування кабелів більшого перерізу та апаратури більшого номіналу;
- підвищення завантаження трансформаторів по струму і зниження допустимого резерву;
- погіршення умов регулювання напруги.

Типові значення $\cos\varphi$ для характерних споживачів:

- асинхронні двигуни при неповному завантаженні: відносно низькі значення (особливо на холостому ході);
- трансформатори на малих навантаженнях також мають погіршений $\cos\varphi$ через намагнічувальний струм;
- активні навантаження (нагрівальні елементи, лампи розжарювання) мають $\cos\varphi$ близький до 1.

З практичної точки зору підвищення $\cos\varphi$ означає зменшення реактивної складової струму та зниження перетікань реактивної потужності:

$$\tan\varphi = Q/P. \quad (1.7)$$

Саме тому компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок спрямована на зменшення Q (а отже і $\tan\varphi$) при незмінному P , що веде до зростання $\cos\varphi$ та покращення техніко-економічних показників роботи системи електропостачання.

Активна потужність P визначає корисне енергоспоживання, реактивна Q відображає обмін енергією з полями індуктивних/ємнісних елементів і створює додаткові струмові навантаження мережі, а повна потужність S характеризує загальну потребу у струмі та визначає вимоги до пропускної здатності елементів електропостачання. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ є узагальненим показником ефективності використання потужності: його підвищення шляхом компенсації реактивної потужності знижує струми, втрати та покращує режим напруги, що формує основу для подальшого

техніко-економічного обґрунтування доцільності застосування конденсаторних установок.

1.2. Причини виникнення реактивної потужності у системах електропостачання

Реактивна потужність є невід'ємною складовою енергетичних процесів у мережах змінного струму, де присутні елементи, здатні накопичувати енергію в електричному або магнітному полі та періодично повертати її джерелу. У реальних системах електропостачання переважна частина навантаження має індуктивний характер, що зумовлює зсув фаз між струмом і напругою, збільшення струмів у мережі та, як наслідок, погіршення техніко-економічних показників. Розуміння причин виникнення реактивної потужності є необхідною передумовою правильного вибору місця, типу та параметрів засобів компенсації.

Фізична природа реактивної потужності

У колі змінного струму миттєва потужність $p(t)=u(t)i(t)$ за наявності реактивних елементів коливається й може набувати як додатних, так і від'ємних значень протягом періоду. Це означає, що частина енергії:

- поглинається навантаженням під час накопичення в полі (магнітному для індуктивностей або електричному для ємностей),
- повертається в мережу під час розсіювання накопиченої енергії.

Для індуктивних навантажень енергія накопичується в магнітному полі котушок та обмоток, а струм, як правило, відстає від напруги. В електропостачанні це проявляється у споживанні додатної реактивної потужності ($Q > 0$). Для ємнісних навантажень (конденсаторів) характерне протилежне – струм випереджає напругу, а реактивна потужність має від'ємний знак ($Q < 0$). Саме на цьому принципі базується компенсація реактивної потужності.

Основні споживачі реактивної потужності на промислових і комунальних об'єктах

1) Асинхронні електродвигуни

Асинхронні двигуни є одним з головних споживачів реактивної потужності. Для створення обертового магнітного поля в статорі необхідний намагнічувальний струм, який майже повністю є реактивним. Особливістю є те, що при недовантаженні двигуна активна складова струму зменшується, а намагнічувальна (реактивна) змінюється незначно, тому $\cos\varphi$ істотно погіршується на малих навантаженнях і на холостому ході.

Це робить питання компенсації особливо актуальним для підприємств із великою кількістю двигунів, що працюють у змінних режимах або з тривалими простоями під напругою.

2) Силові трансформатори

Трансформатори споживають реактивну потужність через струм намагнічування, необхідний для створення магнітного потоку в осерді. Реактивна складова особливо помітна у режимі холостого ходу або при малих навантаженнях та у випадку наявності підвищеної напруги (магнітна індукція зростає, зростає і намагнічувальний струм).

Отже, при надмірній кількості трансформаторів у роботі або при неправильній експлуатаційній схемі (наприклад, паралельна робота при низькому навантаженні) виникає додаткове реактивне навантаження мережі.

3) Дроселі, індуктивні елементи та електромагнітні апарати

До цієї групи належать реактори, пускорегулювальні апарати, електромагніти, контактори, соленоїди та інші пристрої з котушками. Їхня робота напряму пов'язана з накопиченням енергії в магнітному полі, що обумовлює індуктивний характер навантаження і споживання Q .

4) Зварювальні установки, дугові печі, електроприводи з різкозмінними режимами

Зварювання та дугові процеси характеризуються низьким та нестабільним $\cos\varphi$, значними коливаннями реактивної потужності, одночасним внеском у спотворення форми струму (гармоніки), що ускладнює компенсацію та підвищує вимоги до вибору обладнання.

У таких випадках доцільність компенсації часто поєднується з питаннями забезпечення якості електроенергії та запобігання резонансним явищам.

5) Непівпровідникові перетворювачі та нелінійні навантаження

Частотні перетворювачі, випрямлячі, імпульсні джерела живлення, LED-драйвери створюють специфічну ситуацію: навіть за малого фазового зсуву між першими гармоніками напруги і струму, форма струму може бути суттєво несинусоїдною. Внаслідок цього коефіцієнт потужності знижується не лише через $\cos\varphi$, але й через спотворення (зростання гармонік). На практиці це означає, що компенсація лише конденсаторами може бути недостатньою або потребувати спеціальних технічних рішень.

Фактори, що погіршують $\cos\varphi$ та підсилюють перетікання реактивної потужності

До типових причин підвищених перетікань Q у мережах підприємств належать:

- недовантаження електродвигунів та робота обладнання в режимах, далеких від номінальних;
- надлишок трансформаторної потужності або нераціональна схема ввімкнення трансформаторів;
- збільшення частки індуктивних споживачів без відповідного розвитку системи компенсації;
- довгі лінії та кабельні мережі (зростання струмів і падіння напруги при низькому $\cos\varphi$);
- наявність нелінійних навантажень, що потребують врахування гармонік і можливості резонансу в мережі.

З техніко-економічної точки зору ці фактори ведуть до збільшення повної потужності S та струмів у мережі, що погіршує завантаження електрообладнання, підвищує втрати, знижує рівень напруги у вузлах живлення та може формувати підстави для додаткових витрат на модернізацію електричних мереж.

Отже, основними джерелами реактивної потужності в системах електропостачання є індуктивні навантаження, насамперед асинхронні двигуни та трансформатори, а також дроселі й електромагнітні апарати. Додатково на режим реактивного навантаження впливають зварювальні та дугові установки, а також нелінійні споживачі, що створюють спотворення струму. Збільшення перетікань реактивної потужності призводить до росту струмів, втрат та погіршення режимів напруги, що обґрунтовує необхідність подальшого аналізу методів компенсації та вибору раціональної конденсаторної установки для конкретного об'єкта.

1.3. Вплив реактивної потужності на техніко-економічні показники системи електропостачання

Реактивна потужність безпосередньо не перетворюється в корисну роботу, однак її перетікання в елементах мережі (кабельних лініях, повітряних лініях, трансформаторах, комутаційній апаратурі) спричиняє зростання струмів, додаткові втрати активної потужності, погіршення режимів напруги та зниження пропускної здатності системи електропостачання. В сукупності це формує як технічні, так і економічні наслідки, що й обумовлює доцільність компенсації реактивної потужності.

1. Зростання струмів у мережі та наслідки для режимів роботи

Для трифазної мережі при лінійній напрузі U і активній потужності навантаження P струм визначається:

$$I = P / (\sqrt{3} U \cos\varphi). \quad (1.8)$$

Звідси випливає принциповий висновок: за сталої активної потужності P зменшення $\cos\varphi$ призводить до зростання струму у всіх елементах, через які протікає потужність до споживача. Наприклад, зниження $\cos\varphi$ з 0,95 до 0,75 збільшує струм приблизно у $0,95/0,75$ 1,27 раза, а втрати 1,61 раза.

Крім того, повна потужність:

$$S = P/\cos\varphi, \quad (1.9)$$

зростає при зниженні $\cos\varphi$, що безпосередньо впливає на завантаження трансформаторів і можливості приєднання додаткових споживачів без реконструкції мережі.

2. Додаткові втрати активної потужності та електроенергії

Втрати активної потужності в провідниках і обмотках трансформаторів визначаються залежністю:

$$\Delta P = 3I^2R, \quad (1.10)$$

де R – активний опір фази еквівалентної ділянки мережі.

Оскільки $I \sim 1/\cos\varphi$, то

$$\Delta P \sim 1/\cos^2\varphi.$$

Це означає, що навіть відносно невелике погіршення коефіцієнта потужності приводить до квадратичного зростання втрат. Відповідно, річні втрати електроенергії:

$$\Delta W = \int \Delta P(t) dt \approx \Delta P_{\text{сер}} T,$$

де T – тривалість.

Економічний ефект від компенсації формується, зокрема, за рахунок зменшення ΔW , яке прямо конвертується в зниження витрат на електроенергію, а також опосередковано – у зменшення теплового навантаження на кабелі та трансформатори (підвищення їхнього ресурсу).

3. Падіння напруги та погіршення якості електропостачання

Погіршення $\cos\varphi$ збільшує падіння напруги на елементах мережі через підвищення струму та наявність реактивної складової. Для лінії з параметрами R і X (активний та індуктивний опори) наближено:

$$\Delta U \approx (RP + XQ)/U,$$

або в питомих величинах для трифазних мереж:

$$\Delta U \approx (RP + XQ)/\sqrt{3} U.$$

З формули видно, що зростання реактивної потужності Q збільшує складову XQ , що часто є визначальною для внутрішньозаводських мереж із відчутними індуктивними опорами.

Наслідки підвищених падінь напруги:

- зниження напруги на затискачах електродвигунів і, як наслідок, зростання струмів і нагріву;
- погіршення пускових режимів двигунів (збільшення часу пуску, ризик «просідання» напруги);
- нестабільність технологічних процесів, чутливих до відхилення напруги (автоматика, електроніка, керовані приводи);
- необхідність частішого застосування регулювання напруги на трансформаторах або встановлення додаткових джерел підтримки напруги.

Компенсація реактивної потужності локально (біля вузлів споживання) зменшує перетоки Q по лініях, що призводить до зменшення падінь напруги та стабілізації режимів.

4. Зниження пропускної здатності мережі та завантаження трансформаторів

Елементи електропостачання (кабелі, шинопроводи, апаратура, трансформатори) зазвичай обмежуються за струмом або за повною

потужністю S . При низькому $\cos\phi$ для передачі тієї самої активної потужності потрібна більша повна потужність:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Отже, за незмінного P збільшення Q «з'їдає» частину допустимого ресурсу елементів мережі, що проявляється у:

- підвищенні завантаження трансформаторів за S та струмом;
- зростанні втрат у трансформаторах (у першу чергу мідних – I^2R);
- обмеженні можливості приєднання додаткових споживачів без збільшення потужності трансформаторів і перерізів ліній;
- необхідності дострокової реконструкції мережі (економічно значимий чинник).

З позиції капітальних витрат це означає, що підтримання високого $\cos\phi$ дозволяє або відтермінувати модернізацію, або зменшити вимоги до номіналів обладнання при проектуванні/реконструкції.

5. Економічні наслідки перетікань реактивної потужності

Негативний економічний ефект від реактивної потужності формується з декількох складових:

1. Зростання втрат електроенергії в мережі підприємства та на межі балансової належності, що збільшує оплату за активну електроенергію.
2. Підвищення експлуатаційних витрат через нагрівання обладнання, старіння ізоляції та зменшення ресурсу кабелів/трансформаторів.
3. Обмеження пропускної здатності та пов'язані з цим витрати на збільшення перерізів, заміну трансформаторів, розширення РП/ТП.
4. Можливі додаткові фінансові нарахування, пов'язані з режимами реактивної енергії (залежно від чинних договорів і правил ринку), що стимулює споживачів підтримувати нормативні значення коефіцієнта потужності.

6. Узагальнення впливу та роль компенсації

Зменшення реактивної потужності, що перетікає мережею, приводить до комплексу позитивних результатів:

- зниження струмів у лініях і трансформаторах;
- зменшення втрат активної потужності та електроенергії;
- зменшення падінь напруги і поліпшення якості електропостачання;
- вивільнення пропускної здатності мережі і трансформаторів;
- покращення техніко-економічних показників експлуатації електрогосподарства.

Таким чином, компенсація реактивної потужності (зокрема конденсаторними установками) є інструментом, який одночасно вирішує технічні задачі (режими напруги, завантаження) та забезпечує економічний ефект (зниження втрат і витрат, підвищення ефективності використання інфраструктури).

Реактивна потужність, перетікаючи через елементи системи електропостачання, збільшує струми, що веде до квадратичного зростання втрат, погіршення режимів напруги та зменшення пропускної здатності мережі і трансформаторів. Економічні наслідки проявляються у зростанні витрат на електроенергію (через втрати), підвищенні експлуатаційних витрат та потенційній необхідності модернізації електричних мереж. Це формує обґрунтовану потребу в застосуванні компенсації реактивної потужності як засобу підвищення економічної ефективності електропостачання.

1.4. Методи та засоби компенсації реактивної потужності в системах електропостачання

Компенсація реактивної потужності (КРП) – це сукупність технічних рішень, спрямованих на зменшення перетікань реактивної потужності Q у мережі та підвищення коефіцієнта потужності до заданого рівня. Практична мета КРП полягає у зниженні струмів і втрат, стабілізації напруги,

вивільненні пропускної здатності мережевих елементів і, як наслідок, підвищенні економічної ефективності електропостачання.

Засоби компенсації розрізняють за фізичним принципом (ємнісні/індуктивні/керовані силовою електронікою), місцем встановлення, способом регулювання та придатністю до роботи в умовах наявності гармонік і швидкозмінних навантажень.

1. Класифікація методів компенсації реактивної потужності

1) За характером регулювання:

- Фіксована компенсація – ступені ємності (або інший компенсатор) підключені постійно. Рішення просте й дешеве, але не враховує змінність графіка навантаження та може призвести до перекомпенсації.

- Ступенева автоматична компенсація – підключення ступенів конденсаторів здійснюється автоматичним регулятором $\cos\phi$ або Q залежно від поточного режиму.

- Безперервно керована (динамічна) компенсація – забезпечує швидку зміну реактивної потужності у широких межах (SVC, STATCOM), актуальна для різкозмінних навантажень.

2) За місцем встановлення в системі електропостачання:

- Індивідуальна (біля окремого споживача, наприклад двигуна).

- Групова (на секцію шин/групу механізмів).

- Централізована (на вводі підприємства або на шині ГРЩ/РП/ПС).

3) За конструктивним виконанням:

- Конденсаторні установки (КУ) – найбільш поширене рішення для більшості промислових об'єктів.

- Синхронні компенсатори / перенапружені синхронні двигуни – джерела керованої реактивної потужності, переважно для високих напруг або специфічних режимів.

- Керовані тиристорні/транзисторні пристрої (SVC, STATCOM) – високодинамічні системи компенсації.

- Активні фільтри та гібридні системи – орієнтовані на одночасне покращення $\cos\varphi$ та якості електроенергії (гармонік).

2. Конденсаторні установки як базовий засіб компенсації

Конденсатор, підключений до мережі змінного струму, генерує ємнісну реактивну потужність ($Q_C < 0$), яка частково або повністю компенсує індуктивну реактивну потужність споживача ($Q_L > 0$). У результаті зменшується реактивна складова струму та підвищується $\cos\varphi$.

Розрахункова ідея підбору потужності компенсації. Для переходу від початкового $\cos\varphi_1$ до цільового $\cos\varphi_2$ необхідна потужність компенсації (за активної потужності P) оцінюється як:

$$Q_c = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2). \quad (1.11)$$

Типи конденсаторних установок (КУ):

- Фіксовані КУ – доцільні при стабільному режимі навантаження.
- Автоматичні ступеневі КУ (АКУ) – регулюють Q_c дискретно (ступенями) відповідно до зміни навантаження; зазвичай складаються з регулятора $\cos\varphi$, ступенів конденсаторів, апаратури комутації та захисту.
- Динамічні КУ на тиристорних ключах – забезпечують швидке підключення ступенів (актуально при різкозмінних навантаженнях, де контакторна комутація може бути недостатньою).

Переваги КУ:

- висока енергоефективність (малі власні втрати);
- відносно невисока вартість у перерахунку на 1 квар;
- технологічна простота, масштабованість (ступені);
- швидкий економічний ефект за рахунок зниження втрат і розвантаження мережі.

Обмеження та ризики застосування:

- можливість перекомпенсації (підвищення напруги, «ємнісний» режим) при фіксованій компенсації та змінному графіку навантаження;
- чутливість до гармонік: конденсатори знижують еквівалентний реактивний опір на вищих гармоніках, що може призводити до перевантаження конденсаторів струмами гармонік та виникнення резонансних явищ;
- необхідність врахування комутаційних перенапруг і правильного вибору захистів та розрядних пристроїв.

У мережах із суттєвими гармоніками часто застосовують детюновані (захищені від резонансу) конденсаторні установки – КУ з послідовними реакторами, які зміщують резонансну частоту нижче домінуючих гармонік та обмежують гармонічні струми.

3. Синхронні компенсатори та перенапружені синхронні двигуни

Синхронний компенсатор (синхронна машина без механічного навантаження) або синхронний двигун у режимі перенапруження здатні керовано генерувати реактивну потужність (ємнісну) або споживати її (індуктивну) шляхом зміни струму збудження.

Переваги:

- плавне регулювання Q у широких межах;
- підвищення стійкості та підтримка напруги, можливість короткочасних перевантажень;
- позитивний вплив на режими напруги у вузлах мережі.

Недоліки:

- висока капітальна вартість, складність експлуатації та ремонту;
- наявність механічної частини, підвищені втрати та потреба в обслуговуванні;
- обмежена доцільність для мереж 0,4 кВ та більшості внутрішньозаводських задач порівняно з КУ.

Практично такі рішення характерні для вузлів із високими вимогами до регулювання напруги або для мереж середньої/високої напруги, де компенсація має системний характер.

4. Керовані компенсаційні пристрої SVC та STATCOM

Для швидкозмінних режимів (зварювання, дугові печі, великі приводи зі стрибками навантаження) ефективними є пристрої на основі силової електроніки:

- SVC (Static Var Compensator) – статичний вар-компенсатор, який зазвичай поєднує тиристорно-керовані реактори та фільтрокомпенсуючі гілки.
- STATCOM – статичний синхронний компенсатор на базі перетворювача напруги, здатний забезпечувати високодинамічну підтримку реактивної потужності та напруги.

Переваги:

- висока швидкодія (компенсація коливань напруги та Q у динаміці);
- ефективність при різкозмінних навантаженнях;
- можливість покращення якості напруги (залежно від конфігурації).

Недоліки:

- значні капітальні витрати;
- складність налаштування та вимоги до кваліфікації персоналу;
- доцільні переважно у специфічних випадках, де звичайні КУ не забезпечують необхідної якості режиму.

5. Активні фільтри та гібридні рішення

Активні фільтри (APF) призначені для компенсації небажаних складових струму: вищих гармонік, реактивної складової, несиметрії фаз. На відміну від пасивних КУ, активний фільтр формує компенсаційний струм заданої форми.

Переваги:

- ефективна робота в мережах із суттєвими гармоніками;
- одночасне підвищення $\cos\varphi$ і зменшення спотворень струму;
- можливість компенсації несиметрії та окремих проблем якості електроенергії.

Недоліки:

- висока вартість на одиницю компенсованої потужності;

- обмеження за перевантажувальною здатністю та вимоги до умов експлуатації.

На практиці часто застосовують гібридні системи: КУ (як базове «дешево» джерело (Q)) + активний фільтр (для гармонік і тонкого налаштування), що забезпечує оптимум “вартість/ефект”.

б. Критерії вибору засобів компенсації для мереж 0,4 кВ та 6–10 кВ

Для мереж 0,4 кВ найпоширенішим рішенням є автоматичні ступеневі конденсаторні установки на ГРЩ/ЩО або групові КУ на секціях шин. Ключові критерії вибору:

- змінність навантаження та потрібна точність підтримки $\cos\varphi$;
- наявність нелінійних навантажень і рівень гармонік (потреба в детюнуванні або активній фільтрації);
- допустимість частих комутацій (контакторна чи тиристорна комутація);
- вимоги до надійності та сервісу, обмеження за місцем монтажу.

Для мереж 6–10 кВ компенсація часто виконується:

- централізовано на шинах РП/ПС (конденсаторні батареї середньої напруги),
- або комбіновано (частина на 0,4 кВ, частина на 6–10 кВ) з урахуванням топології мережі та вузлів із дефіцитом напруги.

Критерії вибору для 6–10 кВ:

- вплив на профіль напруги та втрати в мережі (ефект від “перенесення” компенсації ближче до джерела чи до навантаження);
- обмеження комутаційних режимів, струмів вмикання, апаратурних рішень;
- вимоги до релейного захисту та експлуатаційної безпеки;
- необхідність анти-резонансних заходів у мережі, особливо за наявності потужних перетворювачів на нижчих рівнях напруги.

У загальному випадку конденсаторні установки є найбільш раціональним рішенням за критерієм “вартість/ефект” для стабільних і помірно змінних навантажень, тоді як SVC/STATCOM/активні фільтри застосовуються при високих вимогах до динаміки та якості електроенергії.

Методи компенсації реактивної потужності включають застосування конденсаторних установок (фіксованих і автоматичних), синхронних компенсаторів, а також керованих електронних пристроїв типу SVC/STATCOM і активних фільтрів. Для більшості внутрішньозаводських систем електропостачання найдоцільнішим рішенням є ступенева автоматична конденсаторна установка, оскільки вона забезпечує підвищення $\cos\phi$ та зменшення втрат при помірних капітальних витратах. В умовах значних гармонік і різкозмінних навантажень доцільно розглядати детюновані КУ, гібридні рішення або високодинамічні компенсатори.

1.5. Нормативно-правові вимоги до режимів реактивної потужності та розрахунків за її перетікання

Обґрунтування доцільності компенсації реактивної потужності на промисловому підприємстві має спиратися не лише на технічні аргументи (зменшення струмів, втрат і падінь напруги), а й на чинні в Україні регуляторні вимоги щодо режимів реактивної потужності в точці приєднання та порядку здійснення розрахунків/плати за перетікання реактивної електроенергії.

1. Нормативна база, релевантна компенсації реактивної потужності

Ключовими документами, які визначають правила взаємодії споживача з оператором системи та формують регуляторні підстави компенсації реактивної потужності, є:

1. Правила роздрібного ринку електричної енергії (Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312) – регулюють договірні відносини на роздрібному ринку, містять визначення та положення щодо послуг із забезпечення перетікань реактивної електричної енергії і плати за них. [1]

2. Кодекс систем розподілу (Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310) – встановлює технічні правила функціонування системи розподілу, у тому числі вимоги щодо регулювання напруги та реактивної потужності й вимогу «нульового перетоку» для непобутових споживачів. [2]

3. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії (Наказ Міністерства енергетики України від 06.02.2018 № 87, зі змінами) – визначає, коли та як здійснюються розрахунки за перетікання реактивної електроенергії, зокрема порогові умови (50 кВт; 1000 кВАр·год) та базові правила розрахунків. [3]

Зазначені документи є чинними та такими, що системно застосовуються для формування вимог до споживача в частині реактивних перетоків; водночас Правила та Кодекс мають редакції зі змінами станом на 2025 рік, що необхідно враховувати при оформленні нормативного підґрунтя роботи. [1]

2. Вимога «нульового перетоку» реактивної потужності в точці приєднання

Кодекс систем розподілу прямо встановлює, що споживачі, крім населення та прирівняних категорій, мають забезпечити в точці приєднання до мереж ОСР нульовий перетік реактивної потужності. У разі невиконання цієї вимоги передбачається плата за компенсацію перетоку реактивної електричної енергії. [2]

Для підприємства це означає, що в ідеальному (нормативно бажаному) режимі обмін реактивною потужністю з мережею ОСР у вузлі приєднання має бути мінімізований. Практично «нульовий перетік» не завжди досяжний миттєво для всіх режимів, однак саме він є орієнтиром для вибору та налаштування засобів компенсації. Найбільш типовий інструмент виконання цієї вимоги в системах промислового електропостачання – конденсаторні установки (фіксовані або автоматичні ступеневі), розміщені в оптимальних вузлах мережі підприємства.

3. Договірне оформлення та обов'язки споживача щодо перетікань реактивної електроенергії

Правила роздрібного ринку визначають «договір про надання послуг із забезпечення перетікань реактивної електричної енергії» як документ, що

регулює правовідносини між споживачем та ОСР/ОСП під час визначення плати за перетікання реактивної електричної енергії. [1]

Важливим для економічного обґрунтування є те, що споживач, який відповідно до затвердженої Методики зобов'язаний здійснювати розрахунки за перетікання реактивної електричної енергії, не має права відмовити оператору системи в укладенні (переукладенні) такого договору. [1]

Окремо Правила встановлюють, що:

- до укладення такого договору відносини щодо розрахунків за реактивні перетоки можуть регулюватися чинними договорами постачання та/або технічного забезпечення електропостачання; [1]

- споживачі, які зобов'язані здійснювати відповідні розрахунки, вносять плату оператору системи відповідно до умов договору; [1]

- кошти від такої плати мають цільовий характер і використовуються оператором системи на технологічні заходи з компенсації перетікань реактивної електричної енергії. [1]

У контексті магістерської роботи ці положення доцільно інтерпретувати як економічний механізм, що стимулює споживача зменшувати небажані реактивні перетоки шляхом упровадження локальної компенсації.

4. Умови застосування розрахунків (порогові значення) та роль Методики

Методика №87 визначає, що розрахунки за перетікання реактивної електроенергії здійснюються:

- за об'єктами непутових споживачів із дозволеною потужністю 50 кВт і більше (з установленими винятками), [3]

- оплата за розрахунковий період проводиться, якщо споживання або генерація реактивної електроенергії становить 1000 кВАр·год і більше (зокрема, за відсутності обліку ці величини можуть визначатися розрахунковим шляхом). [3]

Крім того, Методика прямо підкреслює стимулюючу функцію плати, як адресного економічного стимулу для ініціативи непобутового споживача щодо компенсації реактивних перетоків. [3]

5. Вимірювання та інформаційні вимоги щодо реактивної потужності й установок компенсації

Кодекс систем розподілу встановлює підхід, за яким дані щодо потужності, рівнів напруги та інших параметрів режиму мають отримуватися за результатами контрольних вимірів у режимні дні, а непобутові споживачі несуть відповідальність за достовірність наданих даних. [2]

Окремо Кодекс передбачає обов'язок користувача надавати ОСР інформацію про наявні установки компенсації реактивної потужності (для приєднань понад 1 кВ), включаючи номінальне навантаження/діапазон регулювання, наявність автоматичного керування та точку приєднання. [2]

Отже, нормативно-правові положення формують два взаємопов'язані аргументи на користь компенсації реактивної потужності конденсаторними установками: технічний аргумент: необхідність забезпечення «нульового перетоку» реактивної потужності та економічний аргумент – наявність механізму плати/розрахунків за перетікання реактивної електроенергії. [1]

1.6. Висновки

1. Активна, реактивна та повна потужності формують енергетичний баланс навантаження, а коефіцієнт потужності є ключовим показником ефективності.

2. Реактивна потужність виникає переважно через індуктивний характер споживачів, а її перетікання збільшує струми, втрати та погіршує режим напруги, що робить компенсацію актуальною для більшості промислових електрогосподарств.

3. Перетікання реактивної потужності призводить до зростання струмів, квадратичного збільшення втрат та додаткових падінь напруги, що

формує прямі економічні втрати й обмежує пропускну здатність мережі та трансформаторів, отже компенсація є технічно й економічно доцільною.

4. Існує кілька груп засобів компенсації, однак для більшості внутрішньозаводських мереж найбільш раціональними є конденсаторні установки.

5. Нормативна база України встановлює вимогу мінімізувати (забезпечувати «нульовий») перетік реактивної потужності в точці приєднання та передбачає механізм плати/розрахунків за перетікання реактивної електроенергії, тому компенсація реактивної потужності є не лише технічно, а й регуляторно та економічно обґрунтованою.

РОЗДІЛ 2

ЗАСОБИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1. Компенсація реактивної потужності батареями конденсаторів

Компенсація реактивної потужності є одним із найбільш ефективних і технологічно простих способів підвищення енергоефективності системи електропостачання підприємства. Найпоширенішим засобом реалізації такої компенсації в мережах низької та середньої напруги є батареї конденсаторів (конденсаторні установки), які формують ємнісну реактивну потужність і тим самим зменшують індуктивну складову навантаження. У результаті зменшуються перетоки реактивної потужності по внутрішніх мережах і через точку приєднання, знижуються струми в лініях і трансформаторах, скорочуються втрати активної потужності, покращується рівень напруги у вузлах живлення та підвищується коефіцієнт потужності споживача.

Практична доцільність застосування батарей конденсаторів зумовлена їхніми експлуатаційними перевагами: високою питомою економічністю (низькі власні втрати), модульністю та можливістю реалізації як фіксованої, так і автоматичної ступеневої компенсації з підтриманням заданого рівня $\cos\phi$ у широкому діапазоні режимів.

Оскільки напруга в точці підключення компенсуючого пристрою змінюється в часі під впливом графіка навантаження, комутації обладнання, регулювання трансформаторів та аварійних/перехідних процесів, виникає потреба дослідити, як саме відхилення напруги впливають на величину реактивної потужності, що генерується в мережу.

Актуальність такого дослідження особливо висока для конденсаторних установок, у яких генерована реактивна потужність є функцією напруги та за однакової встановленої ємності може істотно відрізнятись від розрахункової при відхиленнях напруги від номіналу. Це створює ризики недокомпенсації в режимах заниженої напруги (коли потрібна підтримка напруги та зменшення перетоків Q), а також

перекомпенсації при підвищеній напрузі, що може призвести до небажаного зростання напруги в вузлах мережі та виникнення несприятливих режимів у системі електропостачання.

Щоб довести це на прикладах, нижче приведені таблиці та графіки зміни напруги в години максимуму та мінімуму навантаження енергосистеми. Як видно із табл. 2.1 – при різних значеннях напруги у місцях приєднання конденсаторних батарей потужність, що видається також різна.

Таблиця 2.1. Зміна потужності, що видається конденсаторними батареями при граничних відхиленнях напруги

Тип	Потужність при U в.о. ,квар					Вартість, євро
	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	
КРМ-0,4-20-3-5-54	16,2	18,1	20,0	22,1	24,2	700,8
КРМ-0,4-25-3-5-54	20,3	22,6	25,0	27,6	30,3	732,7
КРМ-0,4-30-3-5-54	24,3	27,1	30,0	33,01	42,35	774,9
КРМ-0,4-35-3-5-54	28,4	31,6	35,0	38,6	42,4	799,7
КРМ-0,4-40-3-10-54	32,4	36,1	40,0	44,1	48,4	810,9
КРМ-0,4-45-3-5-54	36,5	40,6	45,0	49,6	54,5	877,9
КРМ-0,4-50-3-10-54	40,5	45,1	50,0	55,1	60,5	923,7
КРМ-0,4-55-4-5-54	44,6	49,6	55,0	60,6	66,6	945,4
КРМ-0,4-60-4-10-54	48,6	54,1	60,0	66,1	72,6	998,8
КРМ-0,4-70-4-10-54	56,7	63,2	70,0	77,2	84,7	1155,6
КРМ-0,4-80-4-10-54	64,8	72,2	80,0	88,2	96,8	1285,2
КРМ-0,4-90-4-10-54	72,9	81,2	90,0	99,2	108,9	1365,3
КРМ-0,4-100-5-10-54	81,0	90,3	100,0	110,2	121,0	1429,9
КРМ-0,4-120-5-10-54	97,2	108,3	120,0	132,3	145,2	1592,2
КРМ-0,4-140-5-20-54	113,4	126,4	140,0	154,3	169,4	1749,0
КРМ-0,4-160-5-20-54	129,6	144,4	160,0	176,4	193,6	1832,3
КРМ-0,4-180-5-20-54	145,8	162,5	180,0	198,4	217,8	1982,0
КРМ-0,4-200-5-20-54	162,0	180,5	200,0	220,5	242,0	2108,4
КРМ-0,4-220-5-20-54	178,2	198,6	220,0	242,5	266,2	2502,7
КРМ-0,4-240-5-20-54	194,4	216,6	240,0	264,6	290,4	2643,8
КРМ-0,4-260-5-20-54	210,6	234,7	260,0	286,6	314,6	2804,0
КРМ-0,4-280-5-20-54	226,8	252,7	280,0	308,7	338,8	3054,6
КРМ-0,4-300-5-20-54	243,0	270,8	300,0	330,7	363,0	3443,3
КРМ-0,4-320-5-40-54	259,2	288,8	320,0	352,8	387,2	3468,2
КРМ-0,4-360-5-40-54	291,6	324,9	360,0	396,9	435,6	3856,2
КРМ-0,4-400-5-80-54	324,0	361,0	400,0	441,0	484,0	4012,5

Приведемо графік зміни потужності, що видається установкою конденсаторів КРМ-0,4-400-5-80-54 в залежності від напруги на її затискачах, який зображений на рис. 2.1.

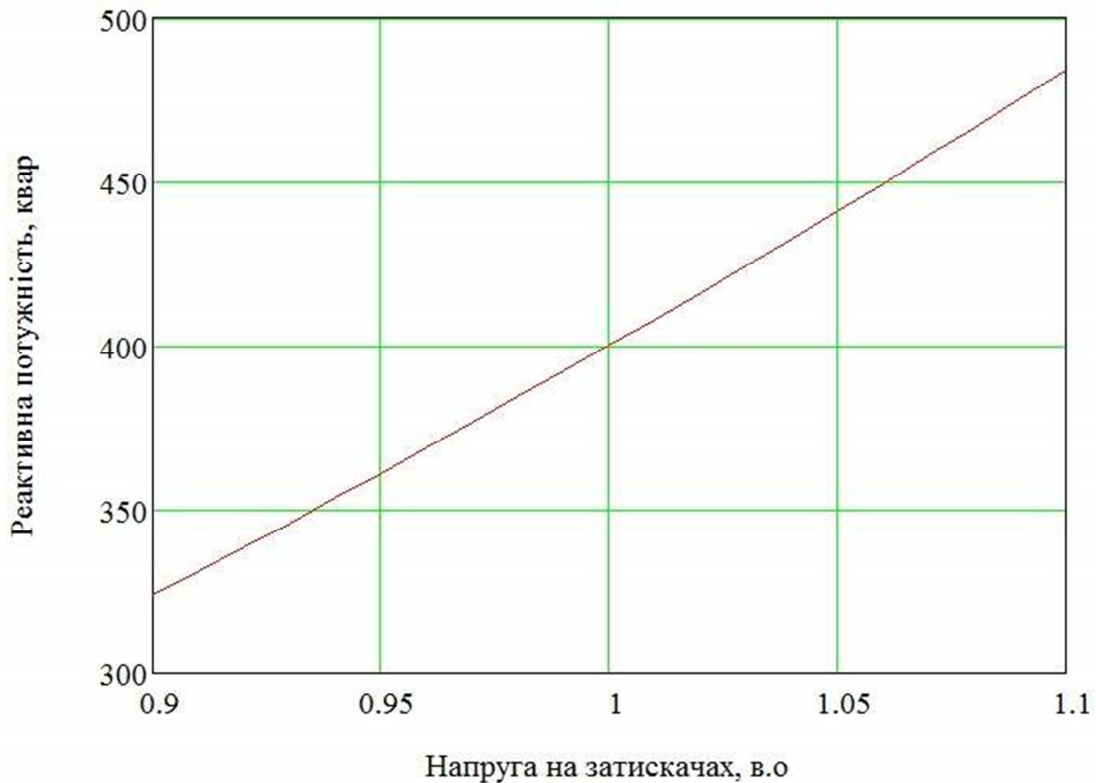


Рис. 2.1. Залежність реактивної потужності батареї конденсаторів $Q_{\text{ном}} = 400$ квар, яка віддається в мережу від напруги на її затискачах (у в. о.).

Залежність реактивної потужності, яка видається конденсаторною батареєю від напруги на її затискачах можна виразити формулою:

$$Q_{\text{д}} = Q_{\text{н}}(U_{\text{д}}/U_{\text{н}})^2, \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{д}}$ – значення реактивної потужності при напрузі $U_{\text{д}}$;

$Q_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – відповідно номінальне значення реактивної потужності та напруги батареї конденсаторів.

Отже, як видно із табл. 2.1 та рис. 2.1, якщо не враховувати залежності потужності, що видається від напруги на затискачах батарей конденсаторів, то неможливо провести ефективну оптимізацію розміщення батарей конденсаторів для зменшення втрат електроенергії в мережах промислових підприємств з достатньою точністю.

2.2. Особливості компенсації реактивної потужності синхронними двигунами

Якщо в електричних мережах споживачів працюють синхронні двигуни (СД), то доцільно розглянути можливість їх більш ефективного використання в режимі КРП. Синхронні двигуни характеризуються невеликими додатковими початковими затратами, оскільки при роботі з випереджаючим коефіцієнтом потужності повна потужність СД $S_{\text{ном}}(\text{сд})$, яка визначає його вартість, зростає в значно меншій мірі, ніж його компенсуюча здатність (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Компенсуюча здатність синхронного двигуна.

Номинальний коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	1,0	0,9	0,85	0,8
Повна потужність, $S_{\text{ном}}(\text{сд})$, %	0	11	17	25
Компенсуюча здатність, $(Q_{\text{сд}}/P_{\text{ном}}(\text{сд}))\times 100\%$	0	48	62	75

В той же час в технологічних процесах багатьох підприємств використовують СД, які можуть використовуватись і для КРП інших споживачів електричної мережі підприємства.

Як показують результати досліджень режимів роботи СД та досвід їх експлуатації, робота СД в тривалому режимі КРП можлива лише при їх недовантаженні активною потужністю при незмінному струмі збудження, рівному номінальному, тобто коли:

- нагрівання обмоток статора і ротора СД не перевищує допустимих норм;
- втрати активної потужності в мережі і в СД, а також оплата за спожиту реактивну енергію оптимальні;
- розподіл напруги по вузлах навантаження мережі підприємства відповідає вимогам;
- при споживанні СД з мережі реактивної потужності забезпечується запас статичної стійкості СД.

При зниженні реактивного навантаження в мережі компенсуюча здатність СД може бути зменшена шляхом зменшення струму збудження.

При організації режиму роботи СД необхідно:

- передбачити можливе збільшення напруги у вузлі навантаження мережі підприємства вище допустимих значень при зниженні навантаження і генерації реактивної потужності СД в цю мережу;
- забезпечити умови статичної стійкості СД при мінімальному навантаженні в мережі підприємства і споживанні СД реактивної потужності з цієї мережі.

З точки зору теплового режиму робота з $\cos\phi = 1$ можлива завжди, навіть при 100%-му активному навантаженні на його валу. При цьому СД не споживає з мережі реактивної потужності. Саме цим і пояснюється доцільність використання СД замість АД тієї ж потужності у всіх технологічно допустимих випадках. У випадку, якщо СД призначений для нормальної роботи в режимі перезбудження, тобто з випереджаючим коефіцієнтом потужності, то він навіть при 100%-му навантаженні активним струмом може компенсувати реактивне навантаження мережі.

Середні відносні допустимі величини реактивної потужності $\alpha(m) = Q_{CD}/Q_{ном}(CD)$ для СД в залежності від коефіцієнта навантаження і напруги наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Залежність відносної допустимої величини реактивної потужності від коефіцієнта навантаження та відносної напруги.

Тип двигуна	Напруга на затискачах	Середні відносні допустимі величини реактивної потужності $\alpha(m)$ при коефіцієнтах завантаження		
		0,9	0,8	0,7
СДН 10 кВ	0,95	1,31	1,4	1,45
	1,0	1,21	1,27	1,33
	1,05	0,96	1,12	1,17

Синхронні двигуни мають більші відносні втрати на 1 квар виробленої реактивної потужності, ніж конденсатори. Але, якщо СД уже задіяні в технологічних процесах підприємств, то їх слід в першу чергу використовувати для компенсації реактивної потужності.

Параметри, за якими здійснюється регулювання реактивної потужності СД, аналогічні параметрам, за якими регулюється потужність конденсаторних установок. Зміна цих параметрів сприймається автоматичними регуляторами СД.

2.3. Постановка задачі оптимізації

Враховуючи вимоги до споживачів, основними з яких є промислові підприємства, а також для зменшення втрат електричної енергії у власній електричній мережі, розвантаження її від реактивних струмів, покращення рівнів напруг, споживачу необхідно проводити заходи пов'язані з компенсацією реактивних навантажень. Виникає питання оптимального вибору типу, потужності і режиму роботи компенсуючих пристроїв в мережі споживача з урахуванням заданого енергосистемою режиму компенсації. Під оптимальним рішенням по компенсації реактивного навантаження за звичай розуміють рішення, яке відповідає мінімально можливому при даних технічних обмеженнях значенню функції приведених витрат, яка включає вартість втрат потужності і енергії в мережі і витрат на компенсуючі пристрої.

Критерієм при виборі типу, потужності, місця установки і режиму роботи компенсуючих пристроїв прийнято мінімум приведених витрат (грн.) на джерела реактивної потужності і оплату втрат активної потужності, пов'язану з генерацією і передачею реактивної потужності до місця споживання. Розміщення компенсуючих пристроїв згідно мінімуму розрахункових витрат повинно супроводжуватися оцінкою якості напруги і розробкою заходів по її регулюванню.

Доцільна ступінь компенсації повинна визначатися в кожному конкретному випадку у відповідності з умовами регулювання напруги. Збільшення ступеня компенсації може бути необхідно по технічним умовам: збільшення рівнів напруг і пропускної здатності мереж. Так як оптимізація потоків реактивної потужності в мережі, як правило, позитивно відображається на якості напруги і робить його достатньо гарним без використання інших спеціальних засобів. Тому в умовах експлуатації і при проектуванні необхідно також визначати оптимальну ступінь компенсації реактивної потужності виходячи із вимог окремого споживача.

Вихідними даними для визначення оптимального ступеня компенсації є параметри схеми електропостачання підприємства, місця розміщення джерел реактивної потужності, групові та індивідуальні графіки активних і реактивних навантажень в вузлах або місцях де передбачається установка джерел реактивної потужності.

При розташуванні джерел реактивної потужності враховується, що для досягнення найбільшого економічного ефекту і ефекту регулювання напруги джерела реактивної потужності необхідно використовувати на робочій нарузі електроприймачів, які споживають реактивну потужність, і розташовувати їх в безпосередній близькості від них.

Із групових графіків знаходять найбільші активні і реактивні навантаження в період максимумів підприємства і енергосистеми, найменші активні і реактивні навантаження в період найменших реактивних навантажень підприємства (в ремонтні зміни, вихідні дні, перерви між змінами). Найменші реактивні навантаження використовуються для визначення частини джерел реактивної потужності яка не регулюється.

По індивідуальним графікам визначаються найбільші активні і реактивні навантаження великих електроприймачів з відносно низьким коефіцієнтом потужності і більшим числом годин роботи в рік.

Батареї конденсаторів є найбільш економічним джерелом реактивної потужності і їх установка в електричних мережах дозволяє знизити величини

необхідної потужності яка генерується на електростанціях, знизити потужність елементів енергосистеми, зменшити втрати активної і реактивної енергії в мережах, а також забезпечити можливість регулювання напруги. Останнє досягається шляхом підключення конденсаторів в ті періоди часу, коли є дефіцит реактивної потужності, і їх відключення в періоди малих навантажень. Таким чином, конденсатори можуть забезпечити значне зниження втрат як при експлуатації існуючих мереж, так і при їх розвитку, дозволяючи здійснювати електропостачання нових споживачів з економією капітальних витрат. Переваги генерування реактивної потужності конденсаторами досить великі.

Присутність технічних та економічних складових у вирішенні поставленого завдання робить доцільним застосування показника розрахункових витрат як критерію оптимальності обраного варіанта реалізації.

Функція приведених розрахункових витрат буде розраховується за формулою з [4] але в дещо спрощеному варіанті так, як синхронні двигуни не планується використовувати:

$$Z(Q) = p \sum_{i=1}^n K_i(Q_i) + C_o T \left[\sum_{i=1}^n (\Delta P_{Ki} Q_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(Q_{Hi} + \Delta Q_i)(Q_i)(Q_{Hj} + \Delta Q_j)(Q_j)}{U^2 10^3} R_{ij} \right], \quad (2.2)$$

де n – кількість вузлів електричної схеми ;

$K_i(Q_i)$ – функціональна залежність капіталовкладень в конденсаторні установки від їх потужності;

Q_i – реальне значення потужності, що видається конденсаторною установкою з урахуванням фактичної напруги на її затискачах;

p – коефіцієнт річних відрахувань від вартості конденсаторних установок;

$$P = P_H + P_a + P_e,$$

P_H – коефіцієнт ефективності для капіталовкладень;

P_a, P_e – відповідно коефіцієнти амортизаційних відрахувань та експлуатаційних витрат.

C_0 – вартість 1 кВт·год електроенергії;

T – кількість годин роботи конденсаторних установок на рік;

ΔP_K – питомі втрати активної потужності на генерацію реактивної в конденсаторах;

R – власні та взаємні опори вузлів схеми;

Q_H – реактивне навантаження в даного вузла схеми;

ΔQ – втрата реактивної потужності в індуктивних елементах мережі від протікання повної потужності.

Більш детально з цільовою функцією (2.2) можна ознайомитись з [4].

2.4. Функціональна залежність капіталовкладень в конденсаторні установки від їх потужності

Постійні витрати складаються із витрат на вимикаючу апаратуру і тих частин на регулюючу, захисну апаратуру і монтаж установки, які не залежать від їх потужності. Другий доданок включає в себе складові, які пропорційні кількості секцій батарей конденсаторів. Коефіцієнт z_k включає в себе питомі витрати на конденсатори, із яких зібрана установка, на втрати потужності і енергії в них, а також на ті частини витрат на регулюючу, захисну апаратуру і монтаж установки, який залежить від її потужності.

Питома вартість витрат потужності і енергії в конденсаторах C_B визначається за формулою

$$C_B = \Delta P_K C_0 T_B \quad (2.3)$$

де ΔP_K – питомі втрати потужності в конденсаторах, кВт/квар;

C_0 – вартість електричної енергії;

T_B – кількість годин використання установленної потужності батареї конденсаторів. Для батареї без регулювання $T_B = 8760$ год.

Для врахування цього явища часто використовують питомі витрати на батареї конденсаторів, які визначають по формулі:

$$z'_k = \frac{Z_{пост} + mZ_a}{Q_k} + z_k = \Delta z'_k + z_k \quad (2.4)$$

що повністю перетворює функцію цілі на гладку, але вносить певну похибку; так як Q_k заздалегідь невідома, а відповідно, і $\Delta z'_k$ може бути розраховане лише наближено. В процесі подальшого розрахунку $\Delta z'_k$ вважають постійною і незалежною від потужності компенсуючого пристрою. Спроба позбавитись від врахування розривів функції цілі за допомогою періодичного перерахування $\Delta z'_k$ по (2.4) при отриманому на попередньому етапі значенні Q_k і звести, таким чином, задачу до послідовного уточнення рішення шляхом переходу від одної гладкої функції до іншої є математично не коректні. Однак в силу простоти такого урахування витрат на батареї конденсаторів цей спосіб отримав найбільше розповсюдження.

Більш точними є способи, які враховують $Z_{пост}$ в безпосередньому виді і які використовують питомі витрати на батареї конденсаторів, які визначаються тільки двома складовими (2.4):

$$z''_k = \frac{mZ_a}{Q_k} + z_k = \Delta z''_k + z_k \quad (2.5)$$

Для перевірки доцільності установки батареї конденсаторів з урахуванням $Z_{пост}$ приходиться декілька разів вирішувати задачу з гладкою функцією цілі для випадків наявності і відсутності конденсаторної батареї в кожному із вузлів і порівнювати витрати в точках розриву функції.

2.5. Апроксимація вартості конденсаторних установок

Оптимізація режиму реактивної потужності є техніко-економічним розрахунком, тому дуже важливо знати і при прийнятті рішення враховувати економічні аспекти цього питання. Одним з найважливіших чинників який впливає на вибір того чи іншого джерела реактивної потужності є її вартість. Тому спостереження за динамікою зміни ціни з часом та її коригування при техніко-економічних розрахунках може відобразитися на прийнятті та суті оптимального рішення.

Як зазначалося вище капіталовкладення в конденсаторні батареї можуть бути апроксимовані, як функція її потужності за питомою вартістю. Вартості низьковольтних батарей фірми СВ «АЛЬТЕРА» наведені в табл. 2.1.

Графік залежності вартості конденсаторних установок від їх потужності за даними табл. 2.1 наведений на рис. 2.2. Також, на графіку наведена лінія тренду і коефіцієнт детермінації R^2 , який вказує на принципово добру здатність апроксимувати вартість конденсаторних установок, так як $R^2 > 0,9$. В той же час, графік питомих витрат на конденсаторні установки вказує на істотну розбіжність в залежності від потужності (рис. 2.3), особливо для потужності до 200 квар, що пояснюється великим впливом для них постійної складової витрат.

Враховуючи, що значення питомих витрат суттєво змінюється (майже в три с половиною рази питомі витрати на конденсаторну установку потужність 20 і 200 квар, рис. 2.3) можна зробити висновок про те, що метод питомих витрат для обчислення вартості конденсаторних установок може використовуватись лише з деяким наближенням. Розрахунок середньоквадратичної похибки апроксимації за питомими витратами наведений у Додатку А. Він показав, що середньоквадратична похибка при апроксимації лінійною залежністю складає 22,301 %.

Отже, результати обчислень показують, що використання питомих витрат для обчислення вартості низьковольтних конденсаторних установок буде хибним так як їх використання супроводжується великими похибками.

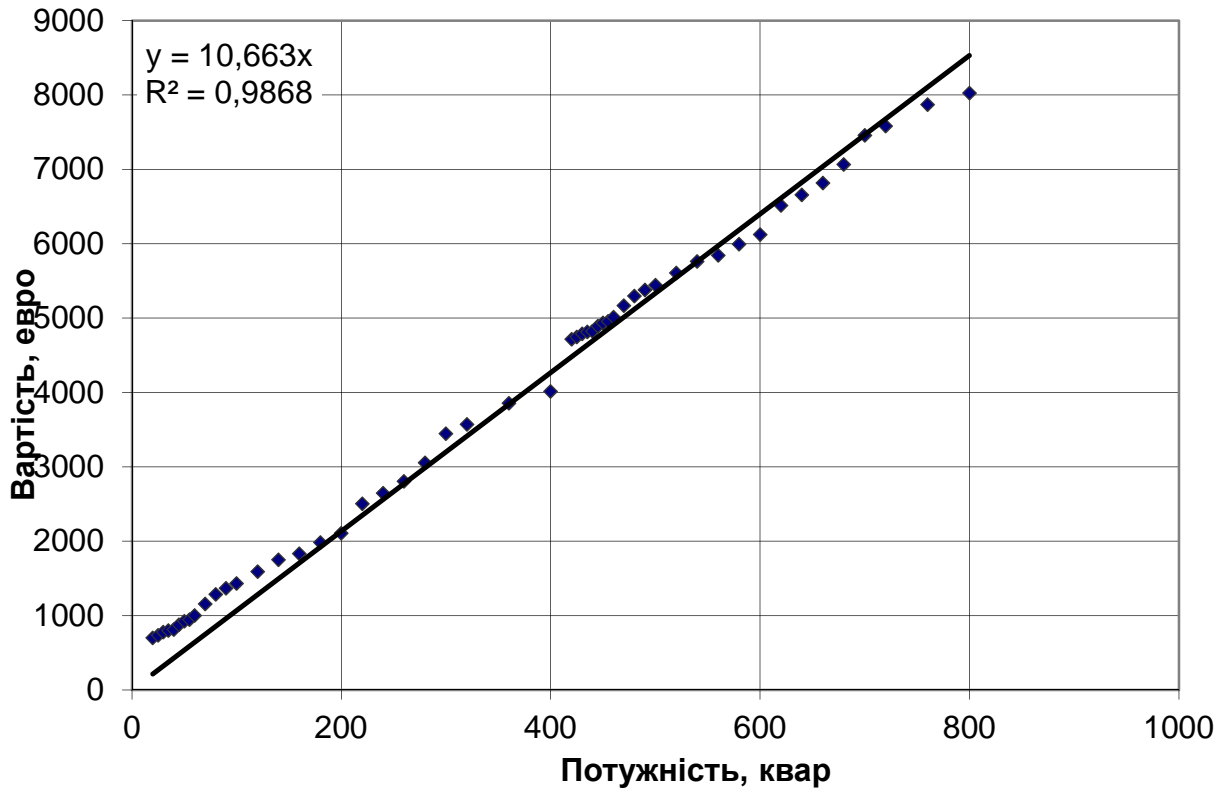


Рис. 2.2. Графік апроксимації вартості низьковольтних конденсаторних установок.

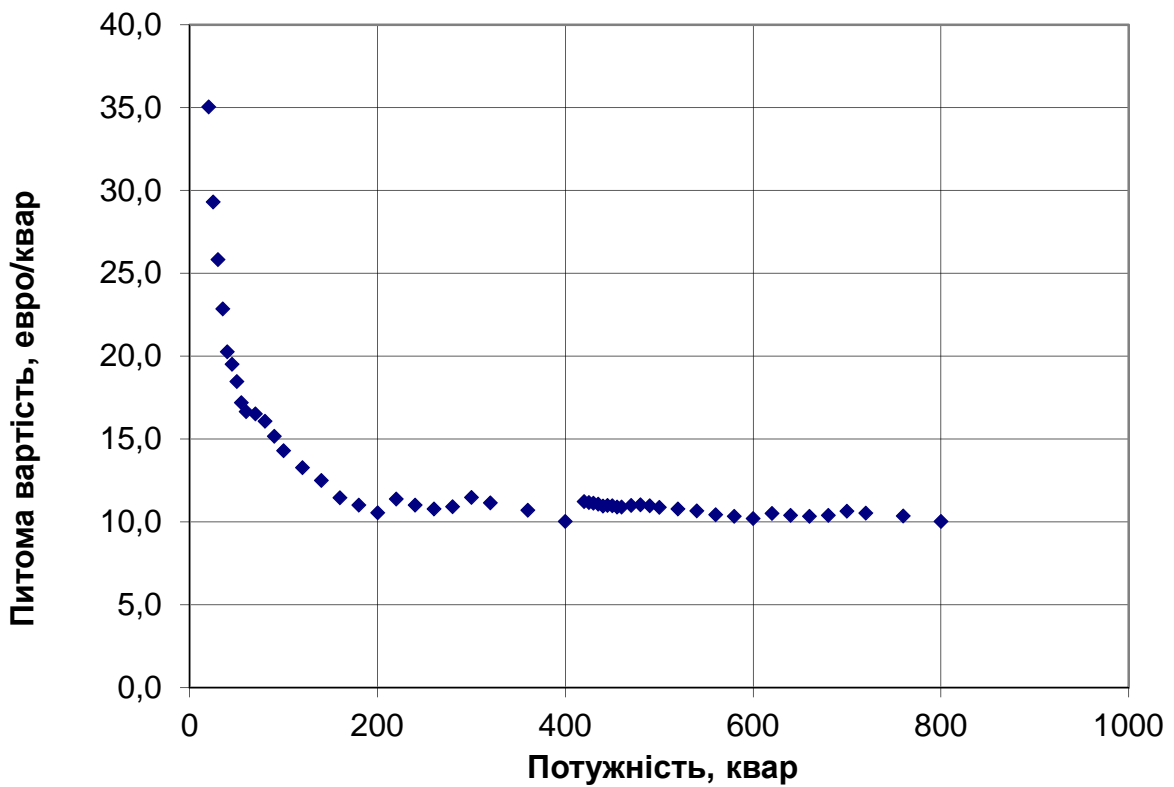


Рис. 2.3. Графік питомих витрат низьковольтних конденсаторних установок.

Причиною великих похибок при використанні питомих витрат є постійна складова у функціональній залежності вартості від потужності конденсаторної установки. Врахування постійної складової в безпосередньому вигляді:

$$Z = z_K Q + Z_{\text{пост}}, \quad (2.6)$$

також не відповідає дійсності так як при потужності $Q = 0$ (розташування конденсаторної установки не передбачається) $Z = Z_{\text{пост}}$, а це призводить лише до збільшення значення функції цілі, відсутності залежності її значення від кількості місць розташувань конденсаторних установок, а також до розрахунку оптимізації потужностей лише по z_K . Для більш точного відображення (2.6) повинна мати розриви при $Q = 0 \rightarrow Z = 0$, а це не дасть змоги використовувати добре розроблені методи нелінійного програмування для пошуку оптимального рішення.

З урахуванням вищезазначеного можна сформулювати низку вимог до функціональної залежності, що описує зв'язок між вартістю конденсаторних установок та їх потужністю, а саме: функція має бути неперервною ("гладкою"); при $Q = 0$ її значення також має дорівнювати нулю ($K = 0$); враховувати фіксовану складову витрат. Зазначеним вимогам найбільше відповідає запропонована емпірична залежність:

$$K = kQ_K + d\sqrt[4]{Q_K}, \quad (2.7)$$

де K – вартість конденсаторної установки;

Q_K – її потужність;

k і d – деякі емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнт d в (2.7) залежить в основному від постійної складової та в меншій степені від змінної, а коефіцієнт k – тільки від змінної.

Розрахунки значення емпіричних коефіцієнтів апроксимації вартості для низьковольтних конденсаторних установок приведені у додатку А. При розрахунку були виключені конденсаторні установки однакової потужності з більшої вартістю. Графіки дослідних точок та апроксимуючої кривої для конденсаторних установок приведено на рис. 2.4, а графік питомих витрат на низьковольтні конденсаторні установки обчислені за емпіричною залежністю на рис. 2.5.

Із аналізу результатів розрахунку похибки апроксимації вартості низьковольтних конденсаторних установок (додаток А) можна зробити висновок про те, що використання емпіричної залежності дає меншу середньоквадратичну похибку, яка сягає: 5,957 % проти 22,301 % при обчисленні за питомими витратами.

Аналізуючи похибки для низьковольтних конденсаторних установок видно, що найбільші похибки характерні для конденсаторних установок меншої потужності, що є аналогічним, як і для використання питомої вартості. Тому, якщо відомо, що потужність низьковольтної конденсаторної установки не вийде за межі потужностей одного типу, наприклад, реактивне навантаження в вузлі менше за 200 квар (максимальна потужність одного типу низьковольтної конденсаторної установки табл. 2.1), а перекомпенсація не допускається, то можливе застосування інших коефіцієнтів апроксимації, які визначені для низьковольтних конденсаторних установок одного типу (додаток А). Це дає змогу зменшити середньоквадратичну похибку до 4,09 %. Графіки дослідних точок та апроксимуючої кривої приведено на рис. 2.6. Графік залежності питомих витрат на рис. 2.7.

Аналогічно було проведено апроксимацію високовольтних батарей конденсаторів (додаток Б). Графік дослідних точок та апроксимуючої кривої приведено на рис. 2.8. Графік залежності питомих витрат на рис. 2.9.

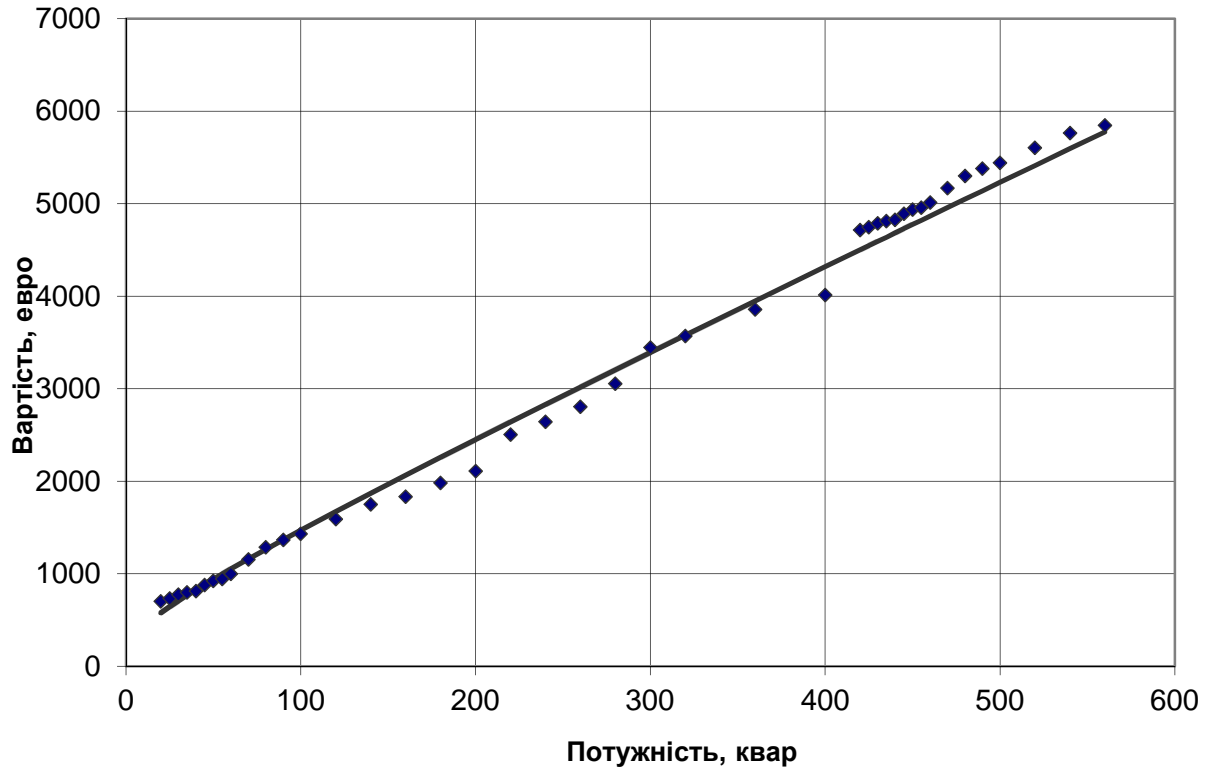


Рис. 2.4. Графік апроксимації вартості низьковольтних конденсаторних установок за емпіричною формулою.

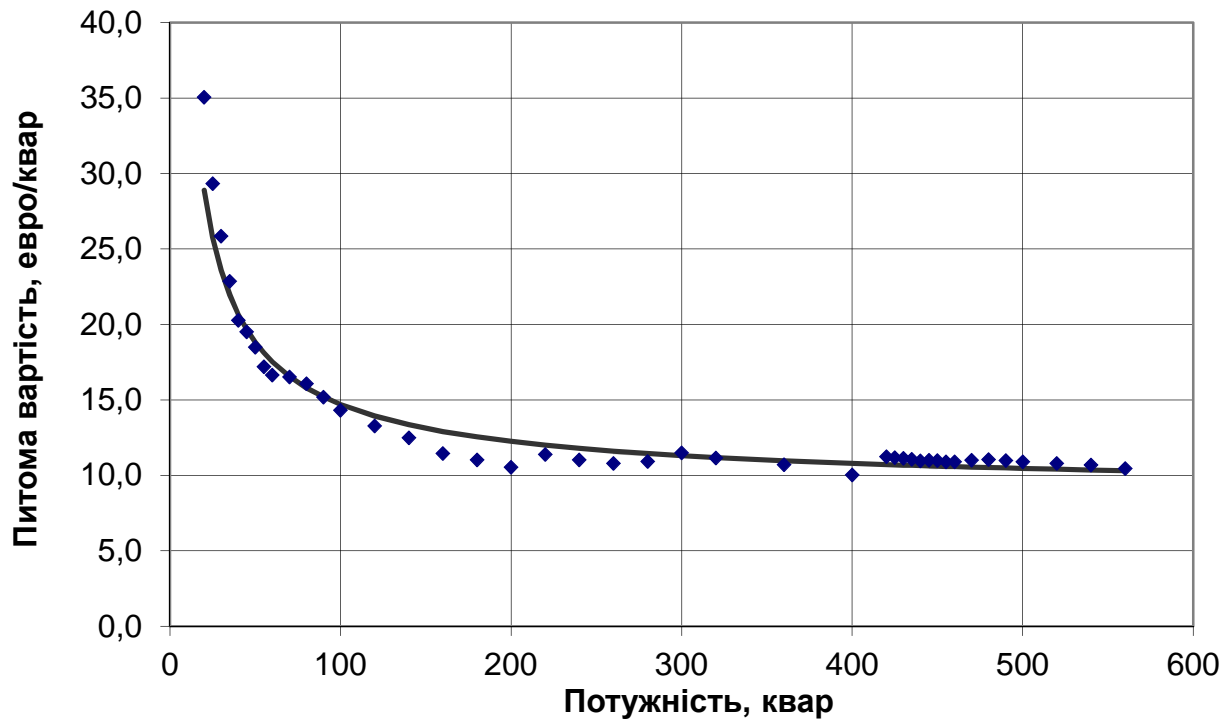


Рис. 2.5. Графік питомих витрат низьковольтних конденсаторних установок за емпіричною формулою.

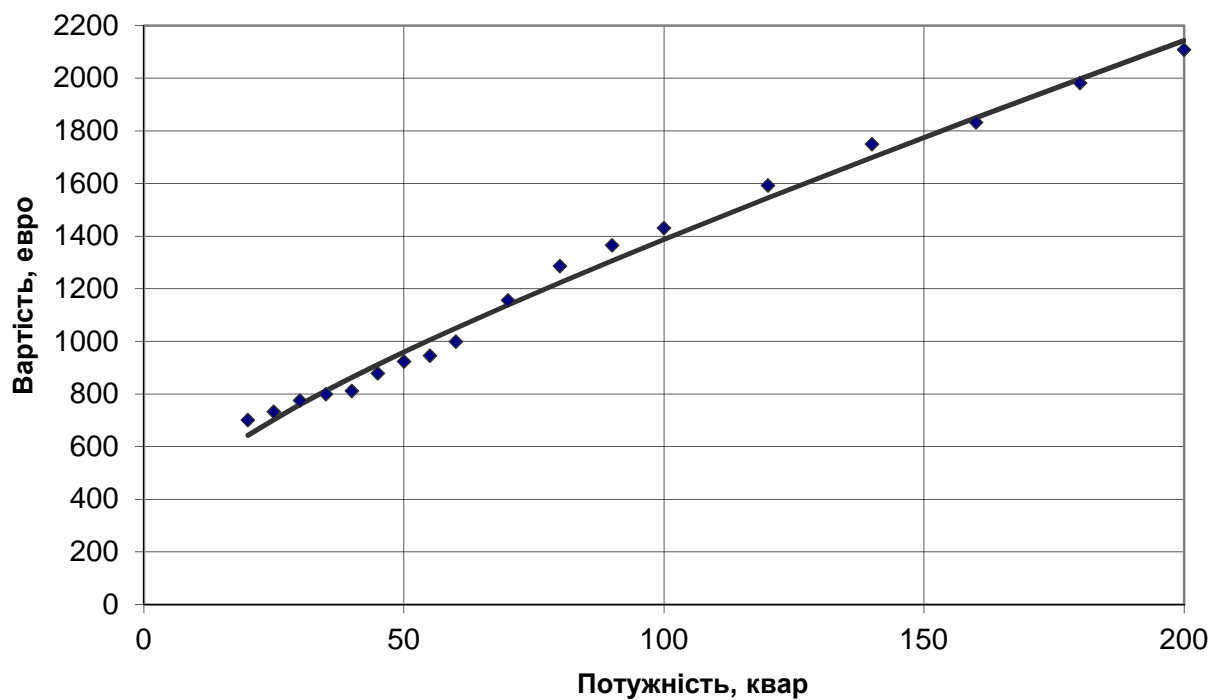


Рис. 2.6. Графік апроксимації вартості низьковольтних конденсаторних установок одного типу за емпіричною формулою.

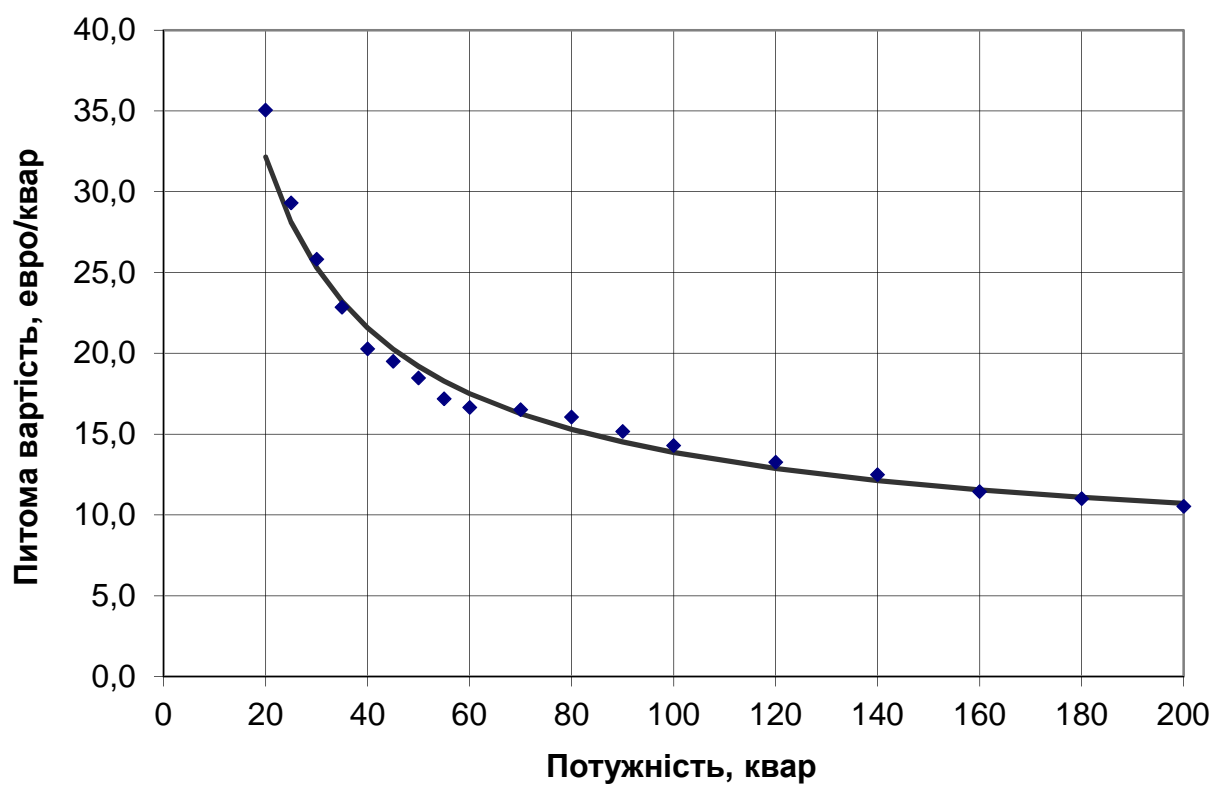


Рис. 2.7. Графік питомих витрат низьковольтних конденсаторних установок одного типу за емпіричною формулою.

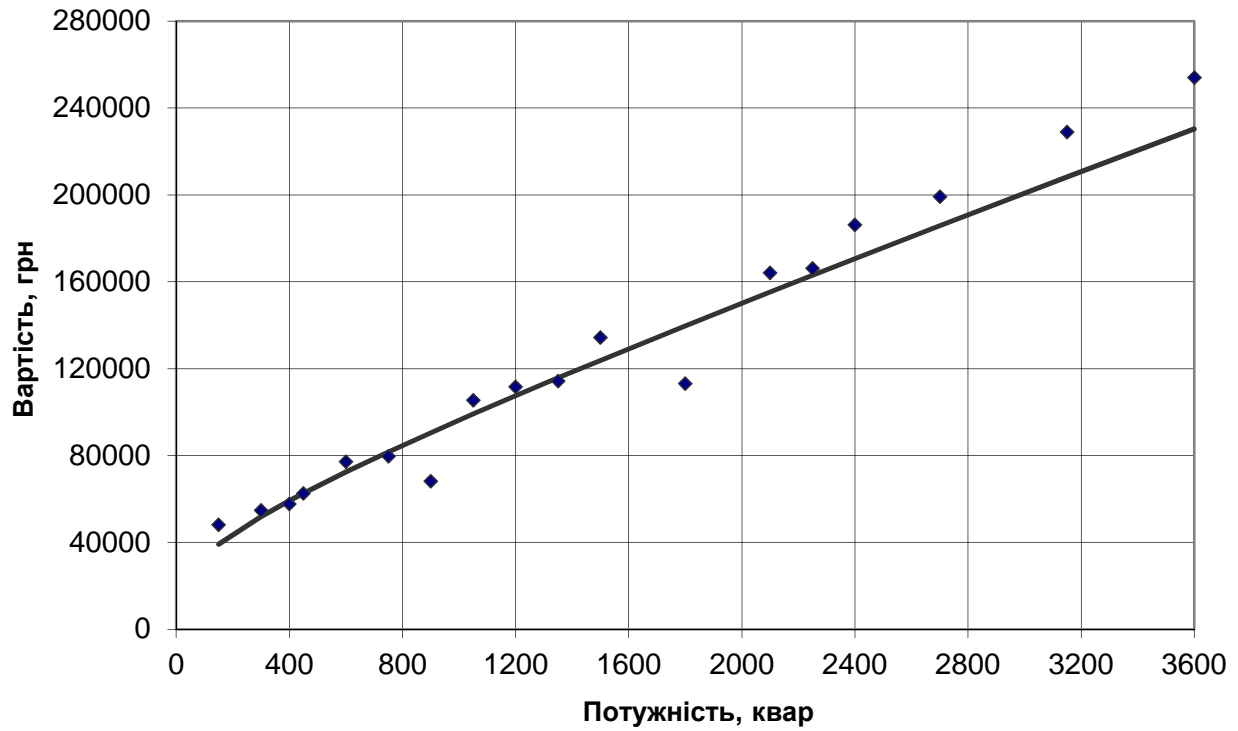


Рис. 2.8. Графік апроксимації вартості високовольтних конденсаторних установок одного типу за емпіричною формулою.

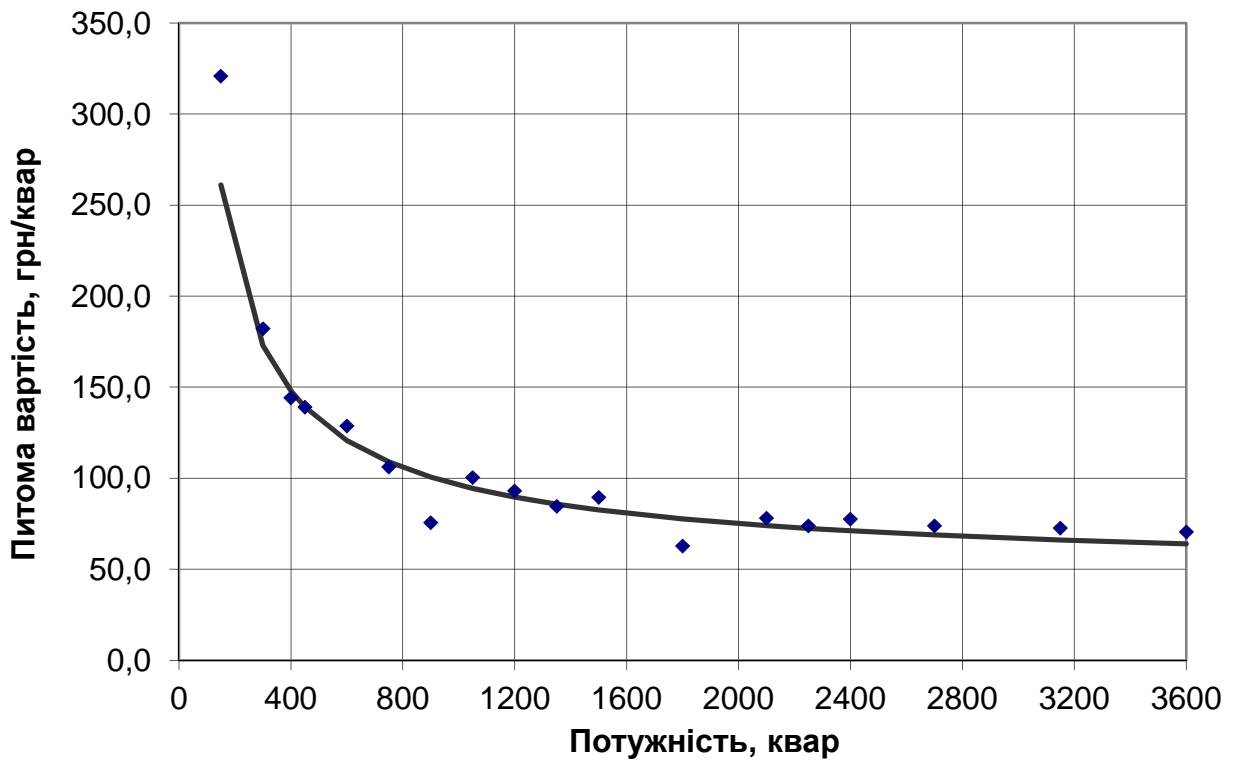


Рис. 2.9. Графік питомих витрат високовольтних конденсаторних установок одного типу за емпіричною формулою.

Проведені дослідження показали, що використання емпіричної формули для знаходження вартості конденсаторних установок дає меншу похибку ніж використання питомих витрат, а також емпірична функціональна залежність вартості від потужності конденсаторної установки враховує постійну складову витрат і немає точок розриву, що дозволяє використовувати при пошуку оптимального рішення звичайні методи нелінійного програмування.

2.6. Математичне формулювання задачі оптимізації

Критерієм оптимальності знайденого рішення є досягнення умовного мінімуму річних розрахункових витрат, тому математичне формулювання задачі може бути представлено таким чином:

– встановити числові величини вектора керуючих змінних ($Q_{КПi}$), що забезпечуватимуть мінімум цільової функції (2.2) при дотриманні обмежень, які накладаються на змінні:

$$\left. \begin{array}{l} Z(Q_{КП}) \rightarrow \min \\ B_i \geq Q_{КПi} \geq A_i \\ U_{\max} > U_i > U_{\min} \\ \sum_{i=1}^n Q_{КПi} = Q_{\Sigma} \end{array} \right\} \forall i = 1, n \quad (2.8)$$

де A_i , B_i – нижня і верхня межа обмежень, що накладаються на змінні, величини яких визначаються технічними можливостями джерел реактивної потужності, пропускною спроможністю трансформаторного обладнання, режимними параметрами мережі тощо;

U_{\max} , U_{\min} – максимально і мінімально допустимі значення напруги, виходу за межі яких у вузлі не повинно відбуватися.

За такого формулювання задача належить до класичних задач нелінійного програмування. Продуктивність обчислювального процесу істотно залежить від обраного методу оптимізації, який визначається

відповідно до виду цільової функції та її характеристик. Це зумовлює необхідність дослідження цільової функції з наступним вибором методу її оптимізації.

Оптимальна компенсація реактивних навантажень у системі електропостачання промислових об'єктів є комплексною задачею, що передбачає вирішення кількох взаємопов'язаних часткових задач, результати яких мають узгоджуватися в межах загальної постановки проблеми.

До переліку таких задач належать:

1. Визначення номінальної потужності конденсаторних батарей для всіх вузлів електричної схеми.
2. Оцінка доцільності використання реактивної потужності, яка може генеруватися синхронними двигунами.
3. Побудова графіків регулювання потужності компенсуючих пристроїв протягом робочого циклу.
4. Вибір оптимальних місць розташування компенсуючих пристроїв у структурі електропостачання підприємства з урахуванням техніко-економічних показників.
5. Розробка режимів оперативного управління компенсуючими пристроями залежно від характеру навантаження та часових інтервалів роботи виробництва.

2.7. Аналіз властивостей функції цілі

На першому етапі досліджень необхідно звернутися до простих схем, функції цілі яких можливо відобразити графічно на площині та в об'ємі.

Такий підхід до вивчення функції цілі дозволить глибше зрозуміти фізичну суть явища, і використати отримані результати для розрахунку в більш складних схемах. Зображені на рис 2.10 схеми є типовими для систем електропостачання промислових підприємств, оскільки люба із реальних мереж з допомогою еквівалентування може бути представлена, як один із випадків, що розглядаються (рис. 2.10 а і б), або їх поєднання.

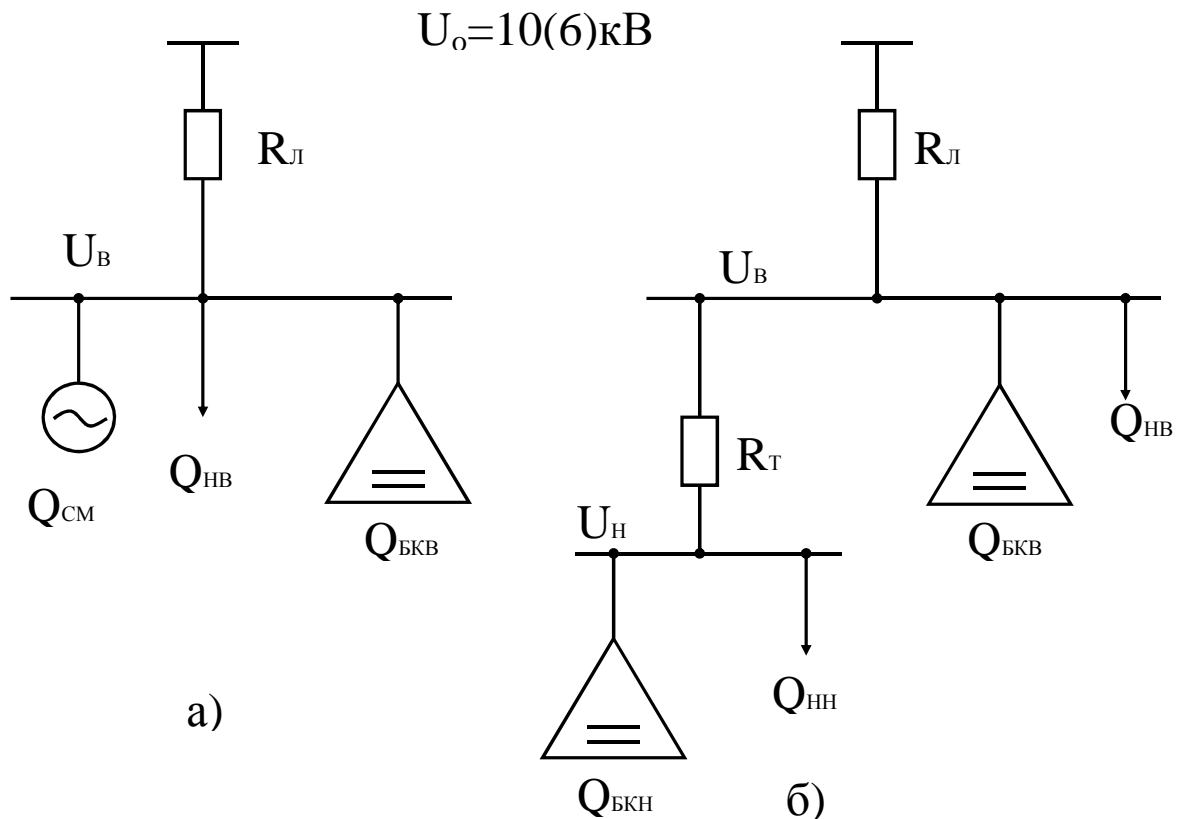


Рис. 2.10. Прості електричні схеми для дослідження функції цілі.

а) з синхронним двигуном; б) з трансформатором 10/0,4 кВ

Таким чином, функція цілі для обох випадків (рис. 2.10 а і б) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} Z(Q_{КП}) = & p(h_{В}m_{Q_{БКВ}} + d_{В}) + C_0T[\Delta P_{БКВ}m_{Q_{БКВ}} + a_{СМ}m_{Q_{СМ}}^2 + \\ & + b_{СМ}m_{Q_{СМ}} + \frac{(m_{Q_{HB}} - m_{Q_{БКВ}} - m_{Q_{СМ}})^2}{|U_{В}|^2} R_{Л}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z(Q_{КП}) = & p(h_{В}m_{Q_{БКВ}} + d_{В} + h_{Н}m_{Q_{БКН}} + d_{Н}) + C_0T[\Delta P_{БКВ}m_{Q_{БКВ}} + \\ & + \Delta P_{БКН}m_{Q_{БКН}} + \frac{(m_{Q_{HB}} + m_{Q_{HH}} - m_{Q_{БКВ}} - m_{Q_{БКН}})^2}{|U_{В}|^2} R_{Л} + \frac{(m_{Q_{HH}} - m_{Q_{БКН}})^2}{|U_{Н}|^2} R_{Т}] \end{aligned}$$

де $h_{В}$, $h_{Н}$, $d_{В}$, $d_{Н}$ – коефіцієнти при змінних і постійних лінійної функції, яка апроксимує вартість батарей конденсаторів високої і низької напруги;

$|U_{В}|$, $|U_{Н}|$ – модулі високої і низької напруги;

T – річна кількість годин роботи вузла навантаження;

C_0 – питома вартість електроенергії.

На рис. 2.10 прийняті такі позначення:

$Q_{НВ}$, $Q_{НН}$ – реактивні потужності навантажень високої і низької напруги;

$Q_{БКВ}$, $Q_{БКН}$ – потужності батарей конденсаторів високої і низької напруги;

R_L , R_T – активний опір лінії електропередачі і трансформатора;

U_B , U_H – напруга на шинах 10 кВ і 0,4 кВ.

Описаним функціям розрахункових витрат в тривимірному просторі відповідають поверхні (рис. 2.11), аналогічні для обох випадків, що розглядаються.

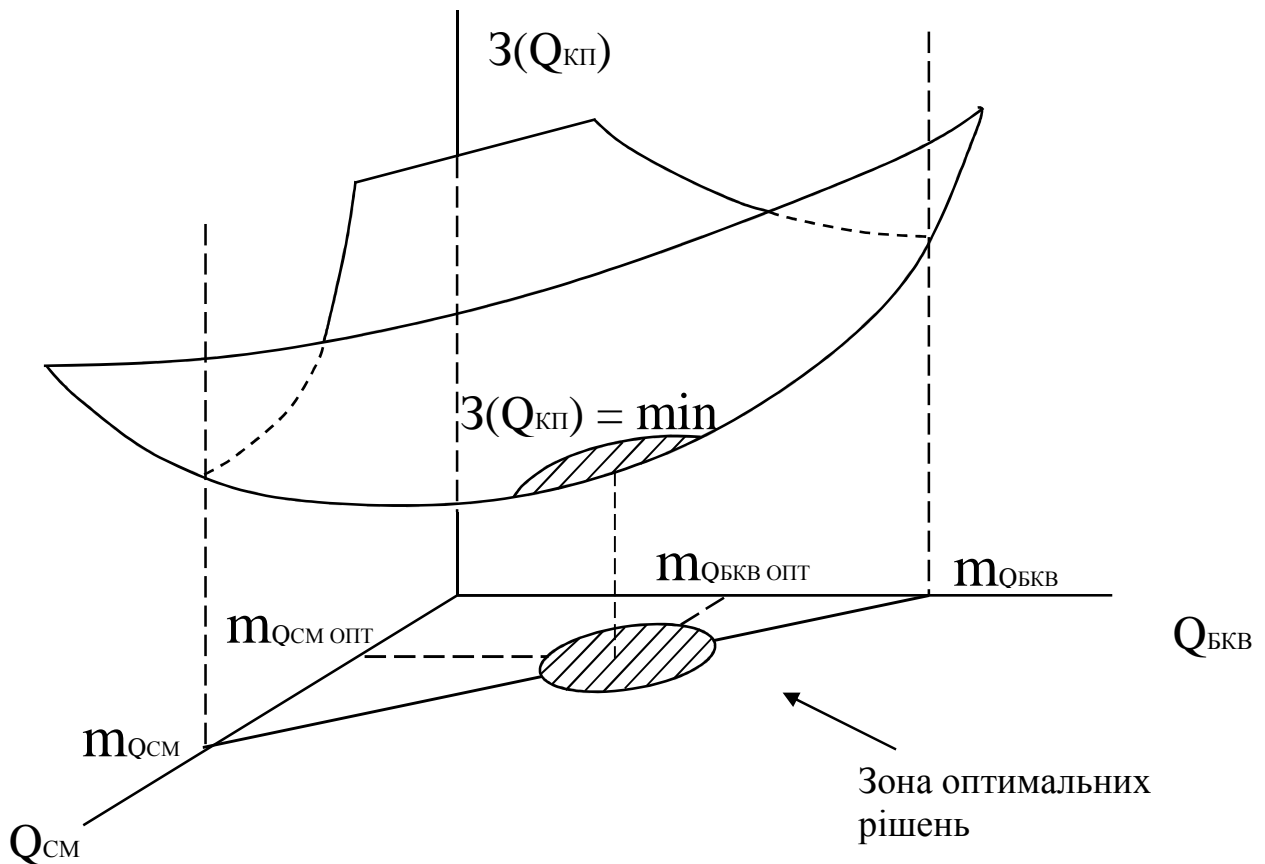


Рис. 2.11. Вид функції цілі в тривимірному просторі:

$m_{Q_{см} OPT}$, $m_{Q_{БКВ} OPT}$ – оптимальні потужності компенсуючих пристроїв;

$m_{Q_{см}}$ $m_{Q_{БКВ}}$ – характерні значення керуючих змінних.

Розсікаючи зображену поверхню площинами, паралельними площині керуючих змінних, з деяким інтервалом по осі $3(Q_{кп})$ і проектуючи отримані перетини на площину $Q_{БКВ}-0-Q_{см}$ можна отримати сімейство ліній рівних значень функції цілі («еквівитратних ліній»), які зображені на рис 2.12.

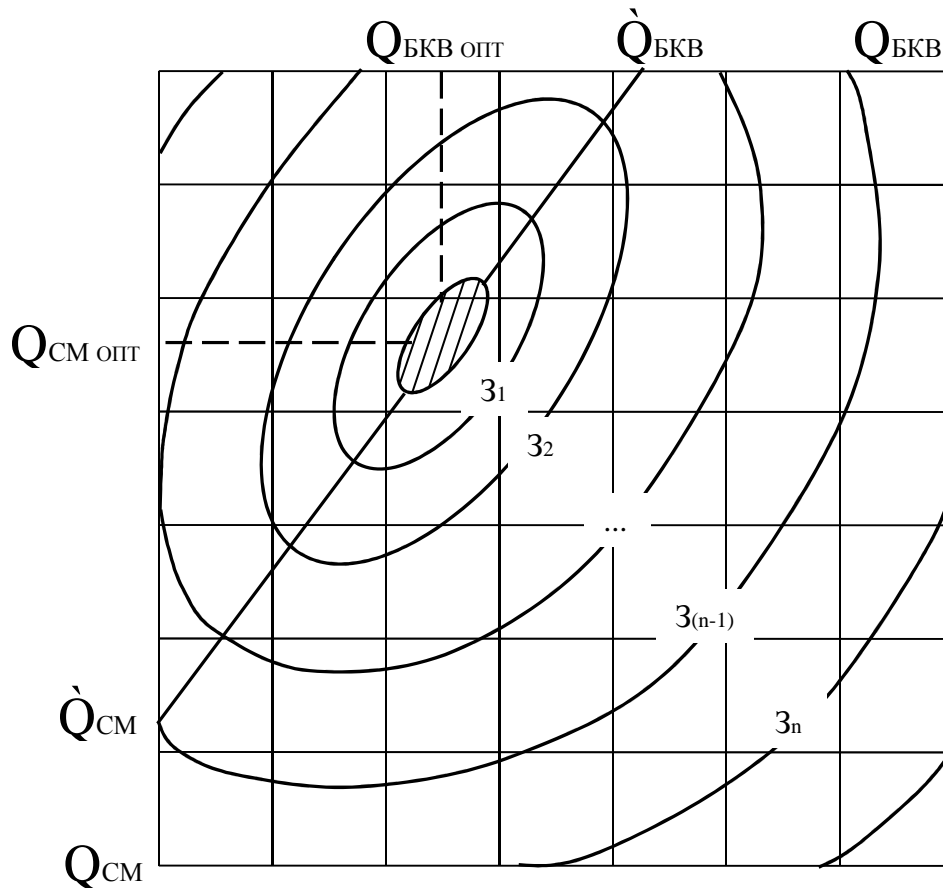


Рис. 2.12. «Еквівитратні лінії» функції цілі.

Аналізуючи форму і взаємне розташування «еквівитратних ліній» для обох випадків, слід відмітити наступне:

1. Лінії рівних значень функції цілі мають форму еліпсів, орієнтація великих осей яких на площині керуючих змінних визначається співвідношенням характерних значень Q_{CM} і $Q_{БКВ}$. Ці значення потужностей можуть бути визначені при почерговій фіксації однієї з них на нульовому рівні зі знаходженням оптимального значення іншої.

2. Значна витягнутість еліпсів «еквівитратних ліній» відносно прямих Q_{CM} і $Q_{БКВ}$ породжує з'явлення, так званих, «ярів» дно яких має малу крутизну. Наявність «ярів» вносить деяку специфіку в знаходження оптимального рішення.

3. Крутизна стінок і дна «яру» при заданому значенні залежить від величини опору лінії електропередачі.

4. Функція цілі для простих схем, які розглядаються не мають локальних екстремумів (сувора випуклість), що дозволяє достатньо просто знаходити для них оптимальні рішення.

Результати досліджень підтверджують:

1. Оптимальне значення $Q_{CM\ OPT}$ і $Q_{БКВ\ OPT}$ утворюють область, яка розташована в центрі «еквівиратних ліній», де $Z \rightarrow \min$;

2. Якщо перше наближення близьке до оптимального, то досягається швидко збігання в області оптимальних значень;

3. Якщо перше наближення потужності компенсуючих пристроїв значно відрізняються від оптимальних, то оптимальне рішення знайти важче, тобто необхідно більше машинного часу.

Якщо в якості функції витрат на конденсаторні установки використовувати емпіричну залежність (2.7) то вид функції витрат на площині дещо зміниться і прийме вид зображений на рис. 2.13. Як видно з графіка площина на відміну від рис. 2.11 має характерне зменшення при $1 \rightarrow Q_{ВН} \rightarrow 0$ і $1 \rightarrow Q_{НН} \rightarrow 0$ яке пояснюється різким зменшенням на величину коефіцієнта d який присутній у функції витрат.

Наявність такого зменшення підтверджує те, що функціональна залежність не має точок розриву і при ($Q \rightarrow 0$) вартість конденсаторних установок теж прямує до нуля. Використання емпіричної залежності для обчислення капіталовкладень не порушує основних властивостей функції цілі, які наведені вище: все одно існує полога зона оптимальних рішень, яка має вигляд еліпса, але за рахунок наявності у графіка такої «кромки» з'являється ще додатково два мінімуми, які знаходяться на «кромці», і один з яких може бути глобальним.

Дослідження впливу напруги на реактивну потужність, що генерується компенсуючими пристроями, є доцільним як з технічної, так і з економічної точки зору. Воно забезпечує коректне визначення параметрів компенсації, підвищує надійність прогнозу економічного ефекту.

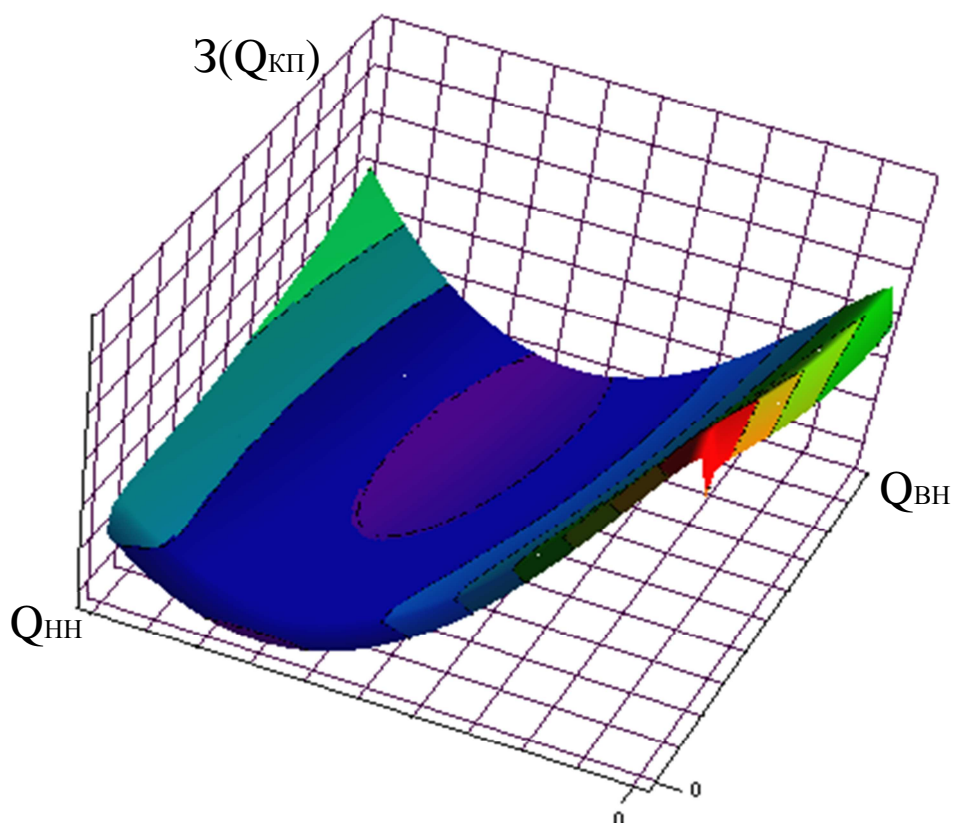


Рис. 2.13. Вид функції цілі в тривимірному просторі при використанні емпіричної залежності для обчислення вартості конденсаторних установок.

2.8. Висновки

1. Батареї конденсаторів є технологічно простим і економічно доцільним засобом підвищення $\cos\varphi$ та зниження втрат, однак їх ефективність істотно залежить від напруги в точці приєднання ($Q \sim U^2$), що вимагає обов'язкового врахування відхилень напруги під час розрахунку та оптимізації компенсації.

2. Синхронні двигуни можуть бути ефективним джерелом реактивної потужності за умови дотримання теплових і режимних обмежень (стійкість, допустимі рівні напруги, оптимальність втрат), тому їх доцільно використовувати для КРП насамперед тоді, коли вони вже задіяні у технологічному процесі підприємства.

3. Оптимізація компенсації реактивної потужності повинна виконуватися як техніко-економічна задача мінімізації приведених (річних)

витрат з урахуванням втрат активної потужності та вартості компенсуючих пристроїв, паралельно із контролем якості напруги та вимог експлуатаційних режимів.

4. Залежність капіталовкладень від потужності КУ має як змінну, так і постійну складові, а спроби «згладжування» функції через питомі витрати спрощують оптимізацію, але можуть вносити методичну похибку і потребують обережного застосування в розрахунках.

5. Використання питомої вартості для оцінки ціни КУ може давати значні похибки (особливо для малих потужностей), тоді як запропонована емпірична залежність вартості від потужності забезпечує суттєво кращу точність і водночас усуває небажані розриви, що підвищує коректність техніко-економічної оптимізації.

6. Задача вибору параметрів компенсуючих пристроїв формалізується як задача нелінійного програмування з мінімізацією цільової функції за наявності технічних обмежень на потужності та допустимі межі напруги, що визначає необхідність обґрунтованого вибору методу оптимізації.

7. Дослідження форми цільової функції на спрощених схемах показує її випуклий характер без локальних екстремумів та наявність «пологих ярів» (еквівитратних еліпсів), що впливає на збіжність пошуку оптимуму і підтверджує доцільність врахування напруги та коректної апроксимації вартості КУ для надійного прогнозу економічного ефекту.

РОЗДІЛ 3

АЛГОРИТМ ТА РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1. Алгоритм розрахунку оптимізації режиму реактивної потужності

Задача оптимізації реактивної потужності системи електропостачання промислових підприємств передбачає забезпечення мінімуму розрахункових витрат при відповідній якості напруги і з урахуванням вимог до споживання реактивної потужності з боку живлячої енергосистеми.

Алгоритм реалізується декількома операціями з використанням програми «ОптимУм». Блок-схема алгоритму зображена на рис. 3.1, а відповідні їй пояснення приведені нижче.

БЛОК 1. Для рішення задачі оптимізації реактивної потужності промислової електричної мережі, в загальному випадку, необхідно мати наступні початкові дані:

1. Електричну схему мережі з відомими перерізами проводів і довжиною ліній електропередач, потужностями і коефіцієнтами трансформації силових трансформаторів, місцями підключення синхронних машин.

2. Відомості про режими роботи споживачів електроенергії у вузлах схеми (змінність і кількість робочих днів на тиждень) і добові графіки зміни потужності навантаження зі змінним осередненням.

3. Інтервали часу, які відповідають відповідно максимуму і мінімуму активного навантаження енергосистеми.

Перераховані вище відомості, необхідні для вирішення задачі, відображають особливості конкретного підприємства. Крім цих даних використовується інформація загального характеру: відносні величини відрахувань від капіталовкладень, питомі втрати потужності в батареях конденсаторів і т.п.

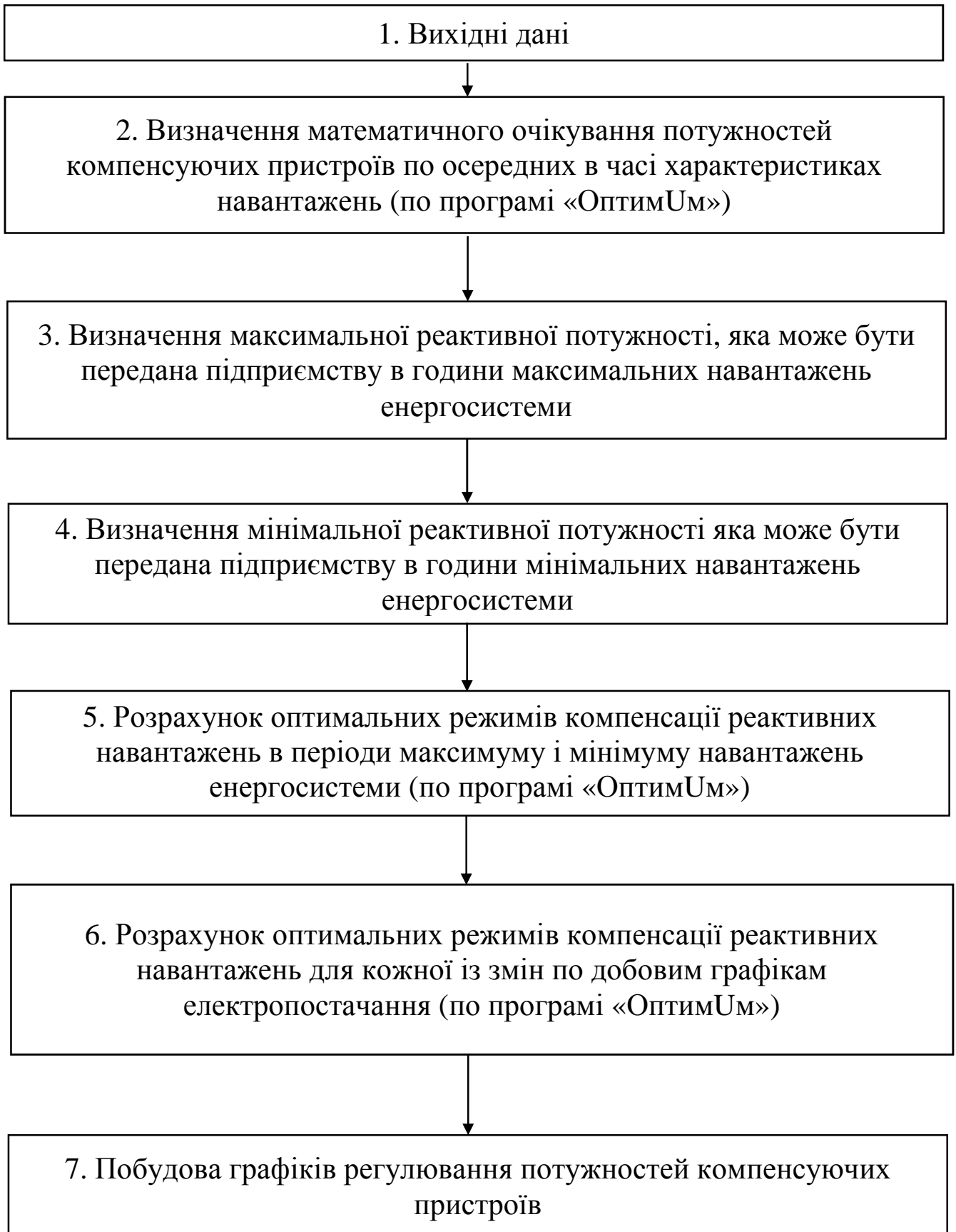


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритму оптимізації режиму реактивної потужності.

БЛОК 2. Математичне очікування потужностей компенсуючих пристроїв, які відповідають мінімуму функції цілі, визначаються з допомогою програми «ОптимUm» по осередненим в часі статистичним характеристикам навантажень, вважаючи відсутність регулювання джерел реактивної потужності. В результаті розрахунку крім вказаних математичних очікувань, які відповідають деякому середньому стану мережі, обчислюються інтегральні характеристики якості напруги. Нижні і верхні обмеження потужностей компенсуючих пристроїв приймаються рівними їх теоретично можливим значенням, виходячи із фізичних міркувань.

БЛОК 3. Визначення економічно обґрунтованої найбільшої величини реактивної потужності, яка може бути передана із енергосистеми в режимі її найбільших навантажень.

Період максимуму активних навантажень енергосистеми характеризується гострим «дефіцитом» реактивної потужності в її мережі. В той же час, як правило, аналогічна ситуація має місце в промисловій електромережі. При повному використанні компенсуючої здатності наявних джерел реактивної потужності нев'язка балансу реактивної потужності підприємства в ці часи повинна бути ліквідована установкою компенсуючих пристроїв додатково до існуючих. Визначення необхідної потужності компенсуючих пристроїв визначається програмою «ОптимUm» виходячи з балансу реактивної потужності по заданим навантаженням та потужності, яка видається енергосистемою.

БЛОК 4. Визначення за технічними умовами найменшої величини реактивної потужності, яка може бути передана із енергосистеми підприємству в режимі її найменших навантажень.

На відміну від режиму максимальних навантажень в періоди мінімальних значень в мережі енергосистеми спостерігається «надлишок» реактивної потужності, що може привести до різкого погіршення якості напруги. В зв'язку з цим енергосистема повинна нормувати мінімальну межу реактивної потужності, що споживається підприємством. Визначення

потужності компенсуючих пристроїв які працюють в мінімальному режимі визначається програмою «ОптимУм» виходячи з балансу реактивної потужності за заданими навантаженнями та потужності, яка лімітується енергосистемою.

БЛОК 5. Тривалість режимів максимального і мінімального активного навантаження системи складає усього декілька годин на добу, але жорсткі технічні умови на споживання реактивної потужності, вимушують проводити спеціальні розрахунки для цих періодів часу. Мета розрахунків полягає в знаходженні потужностей компенсуючих пристроїв, які забезпечують мінімум втрат електроенергії в елементах мережі промислового підприємства і джерелах реактивної потужності. Розрахунки виконуються по програмі «ОптимУм» окремо для обох режимів, при цьому:

а) величини навантажень у вузлах схеми повинні бути задані їх середніми значеннями визначеними на відповідних інтервалах часу;

б) нижні граничні значення і верхні обмеження для компенсуючих пристроїв прийняти рівним в БЛОК 2.

в) значення потужності яке видається енергосистемою, які визначені в БЛОК 3 і 4.

БЛОК 6. Зміна потужності яка споживається електричними навантаженнями, пов'язана з наявністю змінності в режимі роботи споживачів, в багатьох випадках створює необхідність регулювання потужності компенсуючих пристроїв. Метою цього регулювання є забезпечення мінімуму втрат електроенергії і підтримання якості напруги. Аналіз результатів досліджень в цій області показав, що внутрішньозмінне регулювання компенсуючих пристроїв може дати суттєвий ефект зниження втрат електроенергії або покращення якості напруги тільки при різкозмінних навантаженнях. В звичайних умовах, де вони мають відносно «спокійний» характер, достатньо передбачити можливість лише позмінного регулювання з урахуванням періодів часу, які контролюються енергосистемою. Розрахунок оптимальної компенсації реактивних навантажень виконується окремо для

кожної зміни з допомогою програми «ОптимУм». Величини навантажень у вузлах схеми повинні бути задані відповідними їх середньозмінними значеннями. Верхні і нижні обмеження керуючих змінних дорівнюють прийнятим в БЛОК 5.

БЛОК 7. Результати розрахунку, які виконані в БЛОК 5 і 6, можуть бути основою для побудови графіків позмінного регулювання джерел реактивної потужності, згідно мінімуму втрат активної потужності в елементах мережі і компенсуючих пристроїв з урахуванням режимів, які контролюються енергосистемою.

В результаті отримаємо декілька графіків регулювання. При виконанні розрахунків по програмі «ОптимУм» величини річних приведених витрат, відповідають початковому наближенню по керуючим змінним і їх оптимальним значенням, виводяться на друк з іншими результатами розрахунку. Із-за цього в якості початкового наближення зручно використовувати потужності компенсуючих пристроїв при існуючому режимі.

Викладений вище алгоритм придатний для рішення задачі оптимізації режиму реактивної потужності, як в умовах експлуатації, так і при проектуванні системи електропостачання промислового підприємства. Однак, враховуючи прийняття при проектуванні більш «гнучких» рішень, необхідно враховувати специфіку цієї задачі в її проектній постановці:

1. Можливість скорочення кількості силових трансформаторів при переважній компенсації реактивних навантажень на стороні 0,4 кВ. Це має враховуватись при формуванні обох видів обмежень, які накладаються на керуючі змінні.

2. Після розрахунку режиму компенсації реактивних навантажень необхідно перевірити завантаження ліній електропередач і відповідним чином скоригувати обмеження.

3.2. Підготовка вихідних даних і проведення розрахунків з допомогою програми «ОптимUm»

Підготовка вихідних даних починається з обробки схеми електропостачання підприємства і складання схеми заміщення. При цьому враховуються активні, а при необхідності і реактивні опори елементів схеми.

Трансформатор вводиться в схему заміщення опором:

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3} U^2}{S_{HT}^2} \quad (3.1)$$

$$Z_{TP} = \frac{U_{K3} U^2}{S_{HT}} \quad (3.2)$$

$$X_{TP} = \sqrt{Z_{TP}^2 - R_{TP}^2} \quad (3.3)$$

де ΔP_{K3} – втрати короткого замикання;

U_{K3} – напруга короткого замикання;

U – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора;

S_{HT} – номінальна потужність трансформатора.

Лінія вводиться в схему заміщення опором:

$$R_L = r_0 L \quad (3.4)$$

$$X_L = x_0 L \quad (3.5)$$

де r_0 і x_0 – питомі опори лінії;

L – довжина лінії.

Всі опори приводяться до середньої напруги високовольтної розподільчої мережі системи електропостачання підприємства, яке було прийнято в якості базисного:

$$R_{\text{пр}} = R_{\Phi} \frac{U_{\text{Б}}^2}{U_{\Phi}^2} \quad (3.6)$$

де $R_{\text{пр}}$, R_{Φ} – приведений і фактичний опір елементів схеми;

$U_{\text{Б}}$ – базисна напруга;

U_{Φ} – номінальна напруга у вузлі що розглядається.

Після складання схеми заміщення проводиться її аналіз з метою виявлення можливості еквівалентування. Еквівалентуванню підлягають ті частки схеми в яких по яким-небудь причинам не передбачається можливість установки компенсуючих пристроїв. Синхронні двигуни в схемі заміщення представляються в виді окремих гілок з нульовими опорамі (рис 3.2).

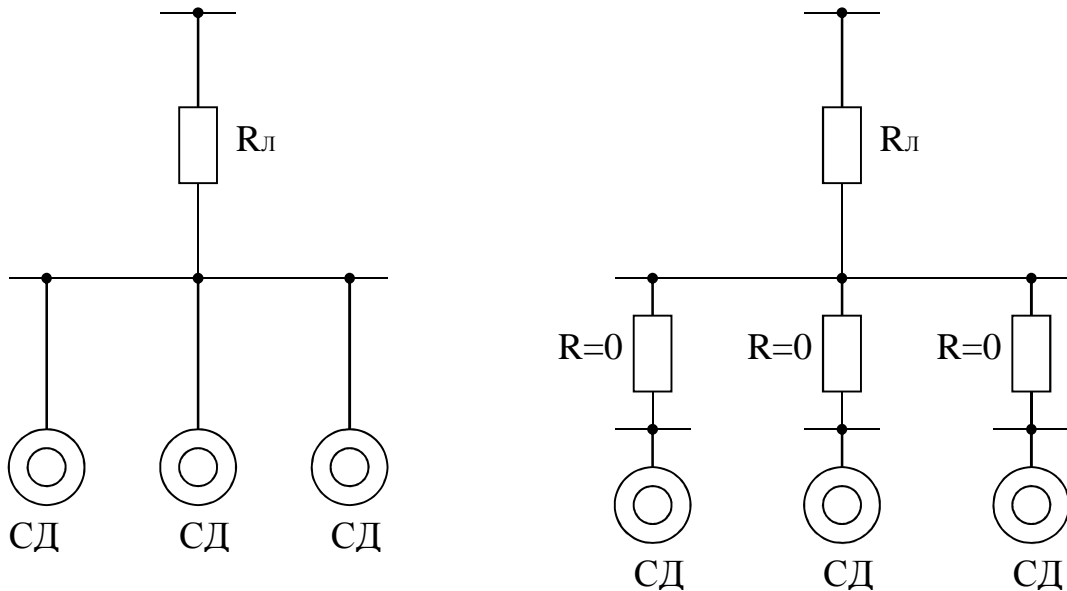


Рис. 3.2. Внесення синхронних двигунів у схему заміщення.

Для апроксимації втрат активної потужності в синхронних двигунах в програмі використовуються коефіцієнти A і B , які визначаються за наступними формулами:

$$A = \frac{D_1}{Q_{\text{нд}}^2}, \quad B = \frac{D_2}{Q_{\text{нд}}} \quad (3.7)$$

де D_1 і D_2 – постійні величини, які залежать від технічних параметрів двигуна, приводяться в довідковій літературі;

$Q_{нд}$ – номінальна реактивна потужність двигуна.

Наступним етапом обробки схеми є нумерація її вузлів. Ця операція виконується за поколінням направленої графа, якими є електрична мережа системи електропостачання. Приклад нумерації вузлів приведено на рис. 3.3.

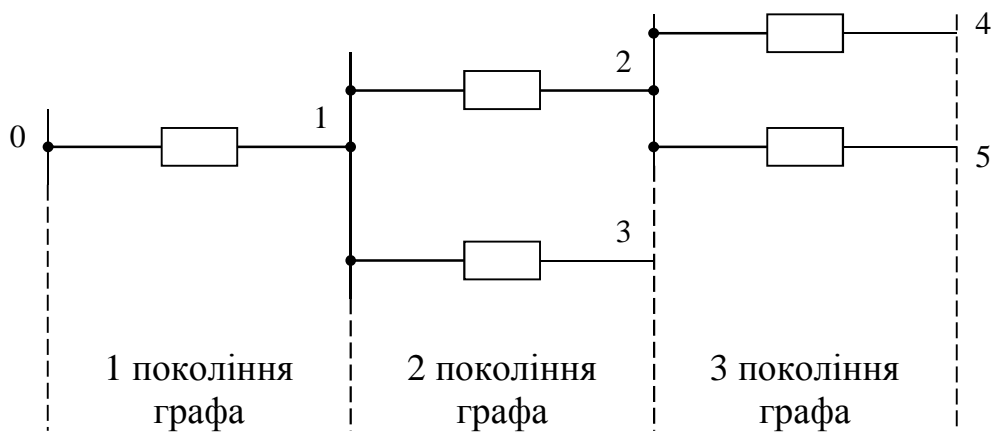


Рис. 3.3. Нумерація вузлів схеми заміщення.

Інформація про реактивні навантаження, а при необхідності і про активні у вузлах схеми повинна бути представлена середніми її значеннями за деякий період. Величина періоду осереднення визначається постановкою задачі. Наприклад, при рішенні задачі оптимізації потужності компенсуючих пристроїв передбачається задавання навантаження їх середньорічними значеннями, а при розрахунку регулювання компенсуючих пристроїв – середньозмінними величинами визначеними по добовим графікам.

На закладку «Відомості про схему» вводяться:

P, Q – відповідно потужність активного і реактивного навантаження;

$Q_{кп}$ – потужність компенсуючих пристроїв першого наближення або вже фактично встановленого;

R, X – відповідно активний і реактивний опір елементів мережі;

A, B – коефіцієнти апроксимації кривої втрат активної потужності в синхронних двигунах, генераторах або компенсаторах;

dK – питомі капіталовкладення в комплектні конденсаторні установки або коефіцієнт K емпіричної залежності вартості (вводиться в залежності від того яким способом обчислюються капіталовкладення).

dP – питомі втрати активної потужності в конденсаторних батареях;

Q_{\max} і Q_{\min} – відповідні максимальні і мінімальні обмеження, які накладаються на керуючі змінні по потужності компенсуючого пристрою;

U_{\min} і U_{\max} – відповідна мінімальна і максимальна напруга в вузлі за межі якої вона не повинна виходити;

$N B$ – масив номерів початків гілок схеми;

d – коефіцієнт емпіричної залежності вартості комплектних конденсаторних установок;

$U_{\text{нб}}$ – номінальна напруга батарей конденсаторів;

Q_0 – реактивна потужність, що видається синхронним двигуном при напрузі рівній U_0 ;

b – емпіричний коефіцієнт залежності відношення реактивної потужності, що генерує синхронний двигун, до відповідної напруги на затискачах;

K_T – коефіцієнт трансформації силового трансформатору.

Для початку розрахунку необхідно натиснути кнопку «Результат» на закладці «Техніко-економічні дані». Результати розрахунку виводяться на закладку «Результати розрахунку», які містять наступні дані:

P , Q – відповідно потужність активна і реактивна по вузлах електричної мережі;

U – напруга по вузлах електричної мережі;

$Q_{\text{ДКП}}$ – дійсна потужність у вузлі навантаження;

$Q_{\text{КП}}$ – потужність компенсуючих пристроїв по вузлах;

$S1$ – відрахування від капіталовкладень;

$S2$ – вартість втрат активної потужності на генерацію реактивної;

$S3$ – вартість втрат активної потужності від протікання реактивної;

F – значення функції цілі.

3.3. Особливості електропостачання ВО «Вторчермет»

Електричні схеми електропостачання як Кіровоградського цеху, так і філіалів відносно прості. Характерним для цих схем є відсутність високовольтного навантаження, а також джерел вищих гармонік і потужних однофазних приймачів.

В технологічній схемі ВО «Вторчермет» впроваджуються механізми, що потребують підвищенні вимоги до відхилень напруги на затискачах електроприймачів. Так як довжина кабельних ліній від трансформаторних підстанцій до розподільчих пунктів і окремих споживачів невелика, то при оптимальному розміщенні компенсуючих пристроїв в мережі підприємства напруга у вузлах мережі майже не зміниться, отже немає необхідності проводити корекцію розрахункових потужностей компенсуючих пристроїв і їх розміщення у відповідності з режимом напруги, але програма робить цей розрахунок автоматично.

Джерелом реактивної потужності може бути тільки батареї статичних конденсаторів, так як синхронних двигунів у переліку електроприймачів немає.

Враховуючи, що навантаження є різкозмінним і значення споживаної потужності в години максимуму значно відрізняються від потужності навантажень в режимі мінімальних навантажень, всі встановлені батареї конденсаторів повинні бути в комплекті із пристроями автоматичного керування реактивної потужності.

3.4. Вихідні дані для розрахунку

Всі необхідні дані для розрахунку формуються в відповідності з інструкцією до програми і представлені в виді таблиць і розрахункових схем, які приведені нижче. Інформація була отримана шляхом безпосереднього огляду існуючих схем електропостачання і на основі технічної документації.

Робота в головному цеху ВО «Вторчермет» ведеться у дві зміни, а у філіалах – в одну. Схема електропостачання наведена на рис. 3.4.

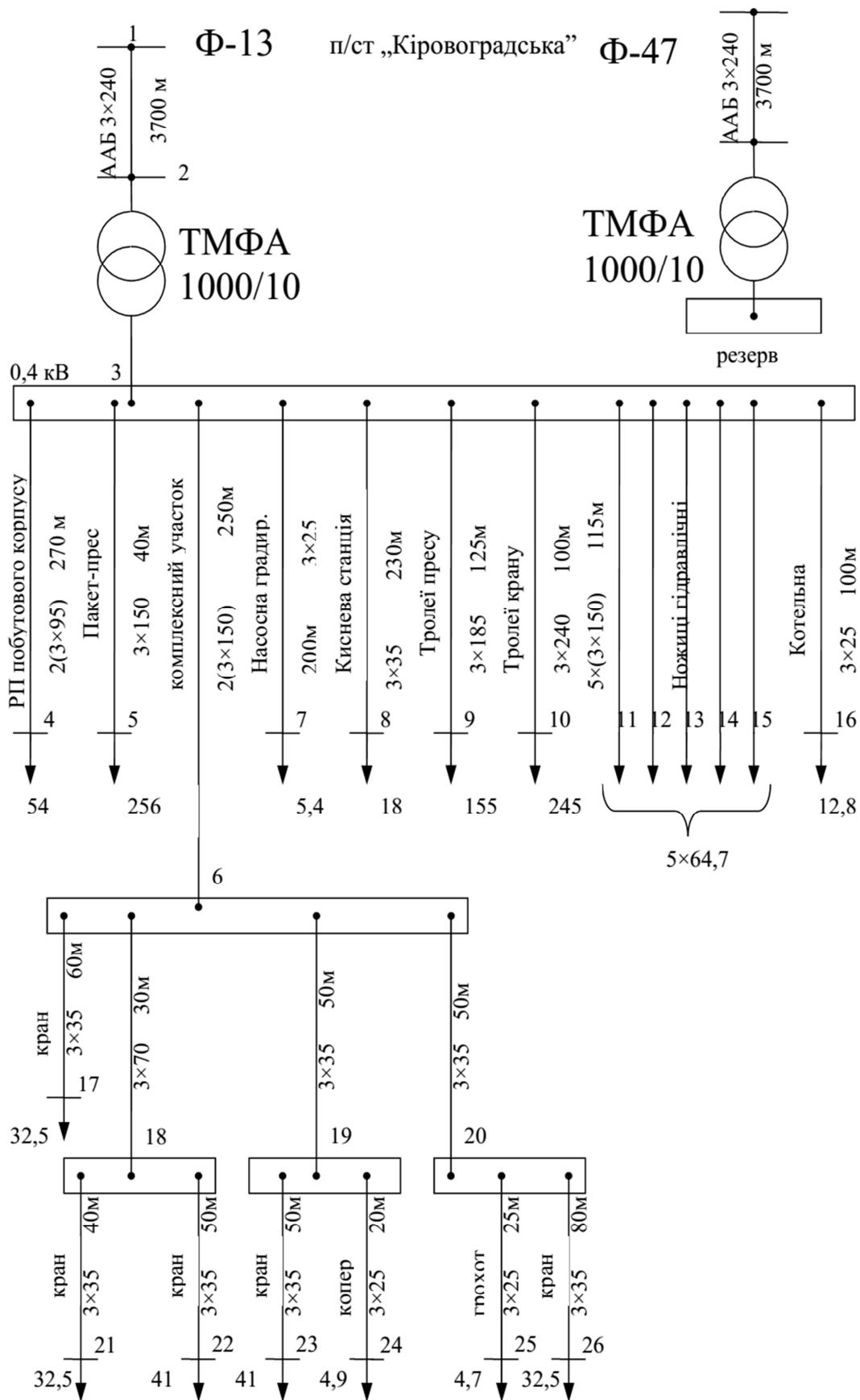


Рис. 3.4. Схема електропостачання Кіровоградського цеху ВО «Вторчермет»

По схемі електропостачання (рис. 3.4) проведений розрахунок опорів її елементів в табличному вигляді – табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Розрахунок опорів елементів схеми електропостачання ВО «Вторчермет».

№ лінії	Переріз кабелю	Питомий опір кабелю R_0 , Ом/км	Довжина лінії, км	Опір лінії, Ом	Приведений опір лінії, Ом	Споживана РП у вузлі, кВар
3-4	2(3×95)	0,31	0,27	0,04185	7,003	54
3-5	3×150	0,206	0,04	0,00824	1,975	256
3-6	2(3×150)	0,206	0,25	0,02575	6,172	189,1
3-7	3×25	1,24	0,2	0,248	12,375	5,4
3-8	3×35	0,89	0,23	0,2047	13,656	18
3-9	3×185	0,167	0,125	0,020875	6,016	155
3-10	3×240	0,129	0,1	0,0129	4,688	245
3-11	3×150	0,206	0,115	0,02369	5,678	64,7
3-12	3×150	0,206	0,115	0,02369	5,678	64,7
3-13	3×150	0,206	0,115	0,02369	5,678	64,7
3-14	3×150	0,206	0,115	0,02369	5,678	64,7
3-15	3×150	0,206	0,115	0,02369	5,678	64,7
3-16	3×25	1,24	0,1	0,124	6,188	12,8
6-17	3×35	0,89	0,06	0,0534	3,563	32,8
6-18	3×70	0,443	0,03	0,01329	1,613	73,5
6-19	3×35	0,89	0,05	0,0445	2,969	45,9
6-20	3×35	0,89	0,03	0,0267	1,781	37,2
18-21	3×35	0,89	0,04	0,0356	2,375	32,5
18-22	3×35	0,89	0,05	0,0445	2,969	41
18-23	3×35	0,89	0,05	0,0445	2,969	41
18-24	3×25	1,24	0,02	0,0248	0,828	4,9
20-25	3×25	1,24	0,025	0,031	1,034	4,7
20-26	3×35	1,24	0,025	0,031	1,034	32,5

Обчислені значення опорів (табл. 3.1) елементів схеми електропостачання (рис. 3.4) нанесені на схему заміщення, яка наведена на рис. 3.5.

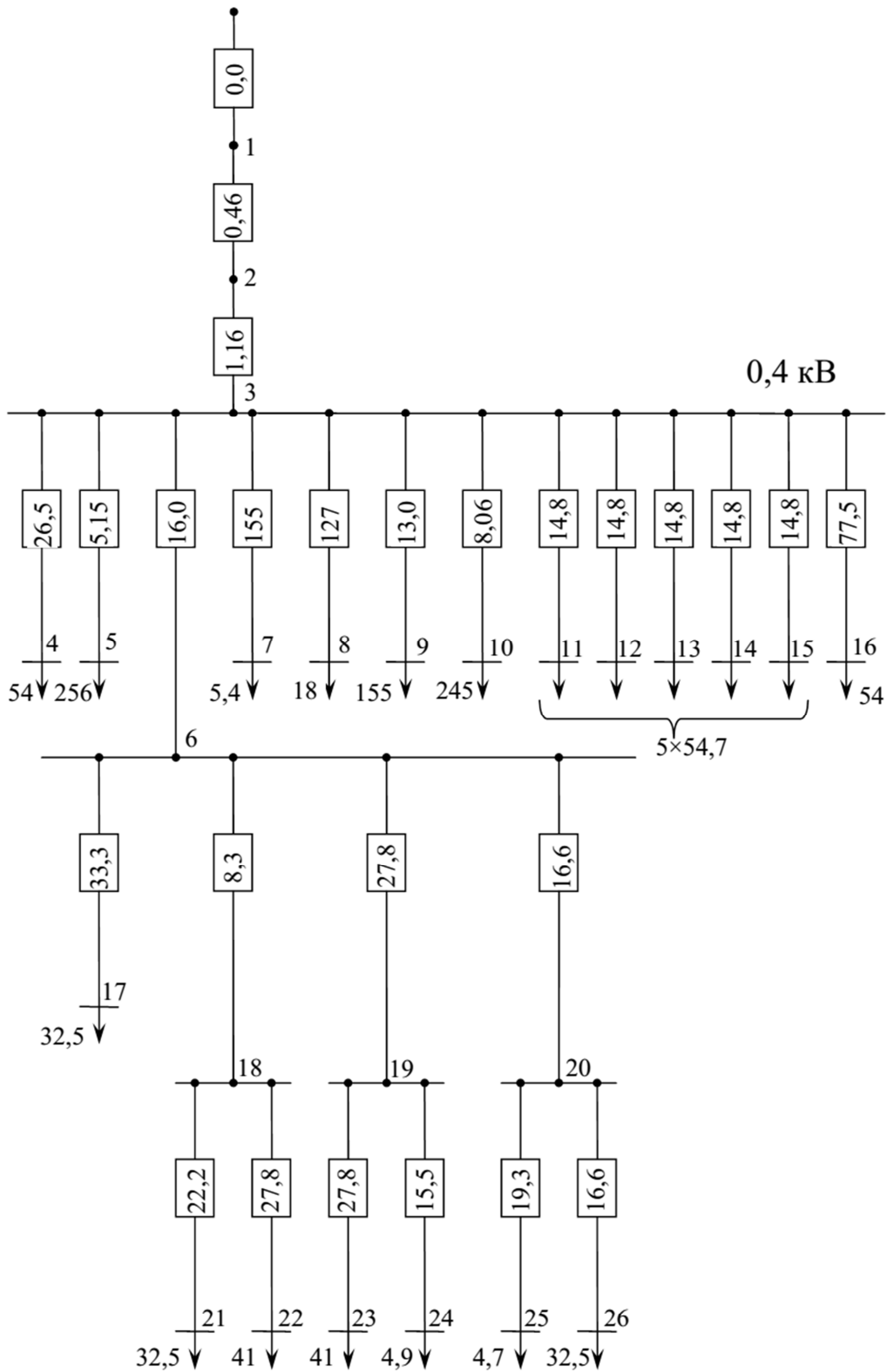


Рис. 3.5. Схема заміщення електропостачання Кіровоградського цеху ВО «Вторчермет»

Параметри схеми заміщення (рис. 3.5) та реактивне навантаження по вузлам (табл. 3.1) внесені в програму «ОптимUm», та проведені відповідні розрахунки. Результати обчислень оптимізації програмою представлені в табл. 3.2 – показники мережі до оптимізації, а в табл. 3.3 – показники мережі після оптимізації.

Таблиця 3.2. Показники мережі до оптимізації

Відрахування від кап. вкладень.....0					
Вартість втрат на генерацію.....0					
Вартість втрат від перетоку.....131597,882					
Значення функції цілі.....131597,882					
=====					
n	P	Q	U	Qдкп	Qкп
=====					
1	50,694	1366,711	10,5	0	0
2	42,912	1362,029	10,462	0	0
3	25,841	1268,856	9,765	0	0
4	0	54	9,725	0	0
5	0	256	9,712	0	0
6	3,21	189,485	9,633	0	0
7	0	5,4	9,757	0	0
8	0	18	9,737	0	0
9	0	155	9,666	0	0
10	0	245	9,643	0	0
11	0	64,7	9,726	0	0
12	0	64,7	9,726	0	0
13	0	64,7	9,726	0	0
14	0	64,7	9,726	0	0
15	0	64,7	9,726	0	0
16	0	12,8	9,756	0	0
17	0	32,5	9,62	0	0
18	0,759	73,581	9,62	0	0
19	0,51	45,954	9,616	0	0
20	0,195	37,221	9,626	0	0
21	0	32,5	9,612	0	0
22	0	41	9,606	0	0
23	0	41	9,603	0	0
24	0	4,9	9,616	0	0
25	0	4,7	9,625	0	0
26	0	32,5	9,619	0	0

Таблиця 3.3. Показники мережі після оптимізації

Відрахування від кап. вкладень.....47114,506
 Вартість втрат на генерацію.....14853,188
 Вартість втрат від перетоку.....23132,989
 Значення функції цілі.....85100,683

n	P	Q	U	Qдкп	Qкп
1	14,633	0,003	10,5	0	0
2	14,632	0,003	10,499	9,598	8,707
3	14,606	-4,41	10,5	735,933	602,431
4	0	54	10,463	0	0
5	0,36	175,893	10,466	80,107	65,998
6	3,373	43,701	10,469	145,724	120
7	0	5,4	10,493	0	0
8	0	18	10,474	0	0
9	0,492	45,619	10,473	109,381	90
10	0,876	50,41	10,477	194,59	160
11	0	64,7	10,465	0	0
12	0	64,7	10,465	0	0
13	0	64,7	10,465	0	0
14	0	64,7	10,465	0	0
15	0	64,7	10,465	0	0
16	0	12,8	10,492	0	0
17	0	32,5	10,457	0	0
18	0,643	73,569	10,457	0	0
19	0,431	45,946	10,454	0	0
20	0,165	37,217	10,462	0	0
21	0	32,5	10,449	0	0
22	0	41	10,445	0	0
23	0	41	10,442	0	0
24	0	4,9	10,454	0	0
25	0	4,7	10,462	0	0
26	0	32,5	10,456	0	0

Аналізуючи отримані результати з табл. 3.2 і 3.3 можна зробити висновок, що існує можливість оптимізації режимів реактивної потужності з метою зменшення втрат електроенергії. Враховуючи, що батареї конденсаторів мають дискретні значення то встановити запропоновані програмою потужності не можливо, тому оберемо найближчі стандартні значення потужності.

3.5. Економічна ефективність впровадження оптимального режиму реактивних навантажень в системі електропостачання ВО «Вторчермет»

Оцінка економічної ефективності впровадження оптимального режиму компенсації реактивних навантажень проводиться порівнянням зведених витрат при існуючому і оптимальному режимах компенсації:

$$E = B_{\text{КН}} - B_{\text{ОПТ}}, \quad (3.8)$$

$$B_{\text{ІСН}} = C_0(\Delta P_{\text{БК}} + \Delta P_{\text{СД}} + \Delta P_{\text{МЕРЕЖІ}})t = B_{\text{ІСНген}} + B_{\text{ІСНперет}}, \quad (3.9)$$

$$B_{\text{ОПТ}} = C_0(\Delta P'_{\text{БК}} + \Delta P'_{\text{СД}} + \Delta P'_{\text{МЕРЕЖІ}})t = B_{\text{ОПТген}} + B_{\text{ОПТперет}}, \quad (3.10)$$

де $B_{\text{КН}}$, $B_{\text{ОПТ}}$ – втрати активної потужності, відповідно, при існуючому і оптимальному режимах

$\Delta P_{\text{БК}}$, $P'_{\text{БК}}$ – в батареях конденсаторів;

$\Delta P_{\text{СД}}$, $\Delta P'_{\text{СД}}$ – в синхронних двигунах;

$\Delta P_{\text{МЕРЕЖІ}}$, $\Delta P'_{\text{МЕРЕЖІ}}$ – в елементах мережі;

t – час роботи підприємства на рік;

$B_{\text{ІСНген}}$, $B_{\text{ОПТген}}$, $B_{\text{ІСНперет}}$, $B_{\text{ОПТперет}}$ – відповідно вартість втрат активної енергії на генерацію реактивної та вартість втрат активної електроенергії від перетоку реактивної при існуючому режимі роботи та при оптимальному.

Обчислимо значення $B_{\text{ІСН}}$ та $B_{\text{ОПТ}}$ за даними з табл. 3.2 та 3.3:

$$B_{\text{ІСН}} = B_{\text{ІСНген}} + B_{\text{ІСНперет}} = 0 + 131597,88 = 1311597,88 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ОПТ}} = B_{\text{ОПТген}} + B_{\text{ОПТперет}} = 14853,19 + 23132,99 = 37986,18 \text{ грн.}$$

Отриманий економічний ефект від зменшення втрат за (3.8):

$$E = B_{\text{КН}} - B_{\text{ОПТ}} = 1311597,88 - 37986,18 = 93611,7 \text{ грн.}$$

Період окупності можна розрахувати за формулою:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{дод}} / (E - C_{\text{загал}}), \quad (3.11)$$

де $K_{\text{дод}}$ – капіталовкладення в установку додаткових конденсаторних батарей;
 $C_{\text{загал}}$ – загальні відрахування на амортизацію, ремонт та обслуговування,
 може бути знайдене за формулою

$$C_{\text{загал}} = K_{\text{дод}} \cdot p, \quad (3.12)$$

де p – сумарний коефіцієнт відрахувань від капіталовкладень.

$$p = E_{\text{н}} + K_{\text{е}} + K_{\text{а}}, \quad (3.13)$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень ($E_{\text{н}} = 0,12-0,2$);

$K_{\text{е}}$ – коефіцієнт експлуатаційних витрат ($K_{\text{е}} = 0,05$);

$K_{\text{а}}$ – коефіцієнт амортизаційних відрахувань ($K_{\text{а}} = 0,05$).

Визначимо додаткові капіталовкладення в конденсаторні установки:

$$K_{\text{дод}} = \sum n_i K_i = 1 \cdot 64291,08 + 1 \cdot 33783,26 + 1 \cdot 18515,83 + \\ + 1 \cdot 25511,34 + 1 \cdot 21875,79 + 1 \cdot 29358,39 = 193335,69 \text{ грн.}$$

де n_i – кількість і-тих конденсаторних установок однакової потужності;

K_i – вартість і-тих конденсаторних установок однакової потужності;

64291,08 – вартість батареї конденсаторів потужністю 400 квар;

33783,26 – вартість батареї конденсаторів потужністю 200 квар;

18515,83 – вартість батареї конденсаторів потужністю 70 квар;

25511,34 – вартість батареї конденсаторів потужністю 120 квар;

21875,79 – вартість батареї конденсаторів потужністю 90 квар;

29358,39 – вартість батареї конденсаторів потужністю 160 квар.

Визначимо $C_{\text{загал}}$:

$$C_{\text{загал}} = K_{\text{дод}} \cdot p = K_{\text{дод}} \cdot (E_{\text{н}} + K_{\text{е}} + K_{\text{а}}) = \\ = 193335,69(0,12 + 0,05 + 0,05) = 42533,85 \text{ грн.}$$

Період окупності додаткових капіталовкладень

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{дод}} / (E - C_{\text{загал}}) = 193335,69 / (93611,7 - 42533,85) = 3,8 \text{ року.}$$

Отже, розглянувши техніко-економічний розрахунок можна зробити висновки, що установка конденсаторних установок дозволяє зменшити вартість втрат електроенергії майже в 3,5 рази. Термін окупності установки конденсаторних батарей складає 3,8 року, що є прийнятною величиною.

3.6. Висновки

1. Розглянутий алгоритм оптимізації режиму реактивної потужності забезпечує мінімум розрахункових витрат за умови дотримання вимог до якості напруги та режимних обмежень з боку енергосистеми й реалізується як послідовність операцій у програмі «ОптимУм» на основі даних про схему мережі та режими навантажень.

2. Підготовка вихідних даних шляхом побудови схеми заміщення та визначення опорів трансформаторів і ліній (за відповідними розрахунковими виразами) формує коректну модель мережі, необхідну для подальшого розрахунку оптимальної компенсації в «ОптимУм».

3. Аналіз системи електропостачання Кіровоградського цеху ВО «Вторчермет» показує, що через різкозмінний характер навантажень доцільним є застосування компенсуючих пристроїв з автоматичним керуванням, узгоджених зі структурою живлення підприємства.

4. Внесення параметрів схеми заміщення та вузлових реактивних навантажень у «ОптимУм» підтверджує можливість оптимізації режимів реактивної потужності (зменшення значення функції цілі з 131597,882 до 85100,683), при цьому практична реалізація потребує вибору найближчих стандартних потужностей КУ через дискретність батарей конденсаторів.

5. Техніко-економічний розрахунок показує, що впровадження конденсаторних установок забезпечує істотне зниження вартості втрат (майже у 3,5 рази) за прийнятного терміну окупності 3,8 року при додаткових капіталовкладеннях 193335,69 грн.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні положення та нормативна база охорони праці при експлуатації електроустановок

Експлуатація електроустановок промислових підприємств належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язана з ризиком ураження електричним струмом, виникнення електричної дуги, пожеж та вторинних травмуючих факторів. Впровадження та експлуатація конденсаторних установок (КУ) для компенсації реактивної потужності не зменшує значущість вимог охорони праці, а, навпаки, висуває додаткові вимоги щодо безпечної комутації, контролю перенапруг, відведення тепла та недопущення доступу персоналу до струмоведучих частин.

Загальні принципи охорони праці під час експлуатації електроустановок

Охорона праці при експлуатації електроустановок базується на поєднанні організаційних та технічних заходів, що забезпечують попередження травмування і мінімізацію аварійних ситуацій. До основних принципів належать:

- Пріоритет запобігання небезпекам над усуненням наслідків: планування робіт, аналіз ризиків, застосування блокувань, огорожень, знаків безпеки.
- Недопущення доступу до струмоведучих частин і виключення можливості помилкового вмикання/подачі напруги під час ремонту.
- Застосування захисних заходів від ураження струмом: захисне заземлення, занулення (для відповідних систем), автоматичне відключення живлення, вирівнювання потенціалів, застосування захисних пристроїв.
- Підтвердження безпечного стану робочого місця: зняття напруги, перевірка її відсутності, заземлення та огороження, оформлення допуску до робіт.

– Компетентність персоналу: відповідна група з електробезпеки, допуски, інструктажі, перевірка знань, тренування дій у разі аварій.

– Використання засобів індивідуального та колективного захисту: діелектричні рукавички, килимки, інструмент з ізольованими рукоятками, захист обличчя та очей при ризику дугового ураження, переносні огороження тощо.

Особливість експлуатації КУ полягає в наявності залишкового заряду на конденсаторах після відключення, можливості комутаційних перенапруг та підвищених струмів вмикання, а також потенційного перегріву при наявності гармонік. Це потребує суворого дотримання процедур зняття напруги, контролю розряду, застосування розрядних пристроїв, коректного вибору захистів і регламентного контролю технічного стану.

Нормативно-правова база охорони праці при експлуатації електроустановок

Нормативна база охорони праці в Україні формується законами, правилами та галузевими нормативними актами, які встановлюють вимоги щодо безпечної організації робіт, експлуатації електроустановок, пожежної безпеки та підготовки персоналу. Для цілей даної роботи найбільш релевантними є такі групи документів:

1. Законодавчі акти у сфері охорони праці. Визначають загальні обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, проведення навчання та інструктажів, забезпечення засобами захисту, організації медичних оглядів і розслідування нещасних випадків.

2. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Регламентують вимоги до персоналу, порядок допуску до робіт, організацію робіт за нарядом/розпорядженням, застосування захисних засобів, проведення перемикань, оглядів і ремонтів у діючих електроустановках. У рамках цих правил визначаються кваліфікаційні вимоги (групи з електробезпеки), відповідальність посадових осіб, порядок призначення відповідального за електрогосподарство та ведення експлуатаційної документації.

3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та технічні нормативи. Встановлюють технічні вимоги до проектування та виконання електроустановок, у тому числі вимоги до захисного заземлення, вибору апаратури захисту, кабельних ліній, ступенів захисту оболонок (IP), допустимих відстаней, маркування й організації електрощитових приміщень. Для КУ важливими є вимоги до комутаційних пристроїв, захисту від коротких замикань і перенапруг, а також до надійності ізоляції.

4. Нормативи з пожежної безпеки. Визначають вимоги до пожежного режиму на підприємстві, категорювання приміщень, утримання електрощитових, застосування кабельної продукції, засобів пожежогасіння та порядку дій у разі займання. Для конденсаторних установок це актуально через можливі перегрівки контактних з'єднань, дугові явища та термічні наслідки аварій.

5. Нормативи щодо засобів індивідуального захисту та випробувань. Регламентують номенклатуру ЗІЗ для електротехнічного персоналу, періодичність оглядів і випробувань діелектричних засобів, порядок зберігання та обліку.

6. Внутрішні документи підприємства. Інструкції з охорони праці, інструкції з експлуатації електроустановок і КУ, оперативні схеми перемикань, журнали огляду та ремонту, програми навчання персоналу. Внутрішні документи повинні узгоджуватися з державними нормативами й деталізувати вимоги саме для конкретного підприємства та конкретного обладнання.

Організація робіт і відповідальність персоналу

Безпечна експлуатація електроустановок передбачає чіткий розподіл відповідальності між посадовими особами та персоналом. На підприємстві має бути призначено відповідального за електрогосподарство, забезпечено систему навчання і перевірки знань, ведення експлуатаційної документації, а також встановлено порядок виконання робіт:

- за нарядом-допуском (для робіт підвищеної небезпеки, в електроустановках понад/до 1000 В залежно від характеру робіт);
- за розпорядженням або в порядку поточної експлуатації (для регламентованих операцій, оглядів, нескладних робіт).

Перед початком робіт персонал повинен виконати комплекс обов'язкових заходів безпеки: відключення, унеможливлення повторного вмикання, перевірка відсутності напруги, встановлення заземлень (за потреби), огороження та вивішування плакатів. Для конденсаторних установок додатково критичним є підтвердження повного розряду конденсаторів до безпечного рівня напруги.

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час монтажу та експлуатації конденсаторних установок

Небезпечні фактори під час монтажу та пусконаладжувальних робіт

Електротравмонебезпека (ураження електричним струмом).

Під час монтажу КУ найбільш критичними є ризики:

- прямого дотику до струмоведучих частин (помилкова подача напруги, відсутність блокувань/огорожень);
- непрямого дотику через пошкоджену ізоляцію або помилки заземлення/занулення;
- появи наведеної напруги на відключених провідниках (паралельні лінії, суміжні кабельні траси, наведення від силових шин).

Ризик залишкового заряду конденсаторів.

Навіть відключена КУ може становити небезпеку через напругу на затискачах конденсаторів. Небезпечні ситуації виникають при:

- відсутності або несправності розрядних резисторів;
- недостатньому часі витримки після відключення;
- відсутності контролю фактичного розряду показчиком напруги перед дотиком до клем.

Дугові явища та наслідки коротких замикань.

Монтаж у діючих електрощитових (або в умовах близькості до діючих шин) супроводжується ризиком утворення електричної дуги через:

- випадкове коротке замикання інструментом;
- неправильне підключення фаз/помилку в схемі;
- дефекти ізоляції, порушення відстаней та повзучих шляхів.

Дуга здатна спричинити термічні опіки, ураження органів зору, баротравму та вторинні травми.

Механічні ризики та травматизм під час монтажу.

КУ часто виконуються у вигляді металевих шаф або модульних батарей із суттєвою масою. Небезпека виникає при:

- підйманні та переміщенні вантажів (травми спини, защемлення, удари);
- роботі з інструментом (порізи, забої, травми кистей);
- роботі на висоті або на кабельних естакадах/лотках (падіння з висоти);
- невпорядкованому робочому місці (спотикання об кабель, матеріали, інструмент).

Пожежні ризики під час підключення та випробувань.

До небезпечних умов належать неправильний вибір перерізів провідників, неякісні контактні з'єднання, помилки підключення захистів. У процесі пробного пуску можливі локальні перегрівки контактів та загоряння ізоляції, особливо за відсутності контролю моменту затягування клем і тепловізійного/температурного контролю.

Небезпечні фактори під час експлуатації конденсаторних установок

Електротравмонебезпека в режимі роботи та при обслуговуванні.

Під час експлуатації основними причинами небезпечних ситуацій є:

- доступ до струмоведучих частин при відкритих дверцятах шаф без блокувань;
- пошкодження ізоляції та корпусів конденсаторів;
- відсутність або деградація захисного заземлення, порушення цілісності РЕ-провідника;

- неправильні оперативні перемикання персоналом.

Залишковий заряд і повторне зарядження.

Після відключення КУ конденсатори мають розряджатися до безпечного рівня за регламентований час. Однак небезпека зберігається також через явище самовідновлення напруги (часткове повернення заряду) або наведення. Це вимагає: витримки часу, примусового розряду (за необхідності), обов'язкової перевірки відсутності напруги перед роботами.

Комутаційні процеси: струми вмикання та перенапруги.

КУ характеризуються високими імпульсними струмами при підключенні, що здатні:

- викликати зварювання контактів контакторів, пошкодження апаратури;
- спричиняти перенапруги та додаткове електричне старіння ізоляції;
- створювати передумови для відмови ступенів автоматичної компенсації.

У випадку частих комутацій (нестабільне навантаження) ризики зростають, що потребує правильного вибору комутаційного елемента (контактор/тиристор), налаштування регулятора та захистів.

Перевантаження струмами гармонік і резонансні явища.

За наявності нелінійних навантажень (частотні перетворювачі, випрямлячі, зварювання) в мережі з'являються гармоніки, які можуть призводити до:

- перевищення струму в конденсаторах і їх перегріву;
- прискореного старіння діелектрика;
- виникнення паралельного/послідовного резонансу «мережа–КУ», що викликає різке зростання напруг і струмів на певних гармоніках.

Це є критичним фактором пожежо- та аварійної небезпеки і повинно враховуватися при виборі детюнованих (реакторних) КУ або фільтрокомпенсуючих рішень.

Аварійні відмови конденсаторів (розгерметизація, руйнування).

Несправності (перенапруга, перегрів, дефект діелектрика) можуть призводити до:

- здуття корпусів, виходу газів, розриву запобіжних мембран (для окремих конструкцій);
- локального короткого замикання в секції;
- вторинних ушкоджень шафи та сусідніх елементів.

Тому експлуатація вимагає регулярних оглядів, контролю температури, ознак старіння та відповідного захисту.

Шкідливі фактори виробничого середовища

Окрім безпосередньо небезпечних факторів, на персонал можуть впливати шкідливі умови:

- Електромагнітні поля поблизу шин, кабельних трас і комутаційних апаратів (актуально для потужних щитів і трансформаторних приміщень).
- Шум і вібрація від роботи контактної апаратури (контактори), вентиляції, а також при дугових/аварійних режимах (як епізодичний фактор).
- Мікроклімат електрощитових (підвищена температура через втрати та недостатню вентиляцію), що підвищує стомлюваність персоналу та ризик помилок.

4.3. Технічні заходи електробезпеки при використанні КУ (0,4–10 кВ)

Безпечна експлуатація КУ у мережах 0,4–10 кВ забезпечується системою технічних заходів, спрямованих на запобігання ураженню електричним струмом, виникненню електричної дуги, пожежам і пошкодженню обладнання. Особливістю КУ є наявність залишкового заряду після відключення, високі струми вмикання, можливі комутаційні перенапруги, а також ризик перевантаження струмами гармонік. Тому технічні заходи електробезпеки повинні охоплювати як класичні вимоги до електроустановок (заземлення, захист від КЗ, огороження), так і специфічні рішення для конденсаторних батарей (розряд, захист від перенапруг, детюнування, контроль температури).

Захист від ураження електричним струмом: заземлення, занулення та вирівнювання потенціалів

Захисне заземлення є базовим технічним заходом, що зменшує напругу дотику на металевих корпусах КУ та шафах керування при пошкодженні ізоляції. Установки компенсації повинні підключатися до системи заземлення підприємства з дотриманням вимог до:

- безперервності та механічної надійності РЕ-провідника;
- перерізу заземлювальних провідників відповідно до очікуваних струмів КЗ;
- опору заземлювального пристрою, який забезпечує ефективне спрацювання захисту.

Для мереж 0,4 кВ (типово системи TN-S/TN-C-S) важливим є правильне виконання системи захисного провідника (РЕ), недопущення його розриву та заборона використання робочого нульового провідника як захисного в точках, де це не передбачено схемою. Для мереж 6–10 кВ, де КУ можуть встановлюватися на шинах РП/ПС, заземлення корпусів та огорожень виконується за загальними правилами для електроустановок середньої напруги з урахуванням розрахункових струмів замикання на землю.

Вирівнювання потенціалів (головне та додаткове) повинно бути забезпечене в електрощитових приміщеннях: металеві конструкції, двері шаф, кабельні лотки, трубопроводи (за наявності) приєднуються до системи заземлення, що мінімізує різницю потенціалів і знижує ризик ураження.

Автоматичне відключення живлення та захист від коротких замикань

Електробезпека і пожежна безпека КУ значною мірою залежать від коректного вибору апаратури захисту та її налаштування. До основних функцій захисту належать:

- відключення при коротких замиканнях у батареї конденсаторів або в приєднувальних колах;
- захист від перевантажень (за струмом/температурою), якщо це передбачено конструкцією;

- локалізація відмови ступеня, щоб запобігти каскадному пошкодженню інших секцій.

У мережах 0,4 кВ застосовуються автоматичні вимикачі та/або запобіжники на вводі і на ступенях, а також реле контролю (за необхідності) перенапруги, перекошу фаз, температури. Вибір характеристик апаратури має враховувати:

- номінальні струми ступенів КУ;
- імпульсні струми вмикання;
- умови селективності з іншими захистами щита.

У мережах 6–10 кВ використовуються комплектні конденсаторні батареї з вимикачами/роз'єднувачами, струмовими трансформаторами, релейним захистом (МТЗ, захист від замикань на землю, перенапруг), а також захистом від внутрішніх пошкоджень батареї (залежно від типу).

Захист від перенапруг та комутаційних впливів

КУ є чутливими до перенапруг, оскільки перенапруга призводить до зростання струму через конденсатор та підвищення електричного навантаження на діелектрик. Технічні заходи включають:

- застосування обмежувачів перенапруг (для відповідного рівня напруги) у вузлах, де можливі грозові або комутаційні перенапруги;
- вибір конденсаторів із допустимим рівнем перенапруги та струму відповідно до умов мережі;
- організацію правильного режиму перемикань (уникнення непотрібно частих комутацій, коректні затримки між вмиканнями ступенів).

Розряд конденсаторів і контроль відсутності напруги

Специфічний для КУ ризик – залишковий заряд після відключення. Для забезпечення електробезпеки необхідні такі технічні рішення:

- наявність розрядних резисторів або інших штатних пристроїв розряду на кожній секції/конденсаторі;
- забезпечення нормованого часу зниження напруги на затискачах до безпечного рівня;

- застосування індикаторів напруги/сигналізації стану (за можливості), що зменшує ризик помилкового дотику;
- обов'язкова перевірка відсутності напруги покажчиком перед початком робіт та, за необхідності, використання переносного заземлення/розрядного пристрою.

Операції технічного обслуговування (підтягування контактів, заміна запобіжників ступеня, огляд конденсаторів) допускаються лише після повного виконання заходів знеструмлення та підтвердження розряду.

Блокування, огороження та попереджувальні засоби

В складі КУ мають бути реалізовані засоби колективного захисту, що унеможливають доступ до небезпечних частин:

- суцільні або сітчасті огороження струмоведучих частин у шафі;
- дверні замки, що відкриваються спеціальним ключем, та міжзамикання (за потреби);
- блокування, що перешкоджає відкриттю дверей при наявності напруги або вмиканню при відкритих дверях (для відповідних конструкцій);
- попереджувальні знаки та маркування (напруга, небезпека залишкового заряду, порядок розряду).

Для КУ середньої напруги (6–10 кВ) особливо важливими є дотримання вимог до міжфазних і фазно-земляних відстаней, використання огорожень та блокувань відповідно до режиму обслуговування РП/ПС.

Вибір і безпечна робота комутаційної апаратури (контактори/тиристори)

Комутація ступенів КУ супроводжується високими імпульсними струмами, тому неправильний вибір контакторів або умов їх роботи може призвести до:

- зварювання контактів;
- термічного перегріву;
- відмови ступеня та аварійної ситуації.

Технічні заходи електробезпеки включають:

- застосування контакторів спеціального призначення для конденсаторних батарей або тиристорних ключів (для швидкодіючих систем);
- введення обмежувальних елементів (якщо передбачено виробником) для зниження імпульсного струму;
- налаштування регулятора з часовими затримками для зменшення частоти перемикачів.

Для різкозмінних навантажень (зварювання, дугові процеси) доцільно застосовувати тиристорні ключі, що зменшують механічний знос та підвищують надійність комутації.

Заходи щодо гармонік і запобігання резонансу (детюнування)

Наявність гармонік у мережі підвищує струмове навантаження на конденсатори і може спричинити резонансні явища. Для забезпечення надійності та безпеки необхідно:

- оцінювати частку нелінійних навантажень та можливий рівень гармонік;
- застосовувати детюновані конденсаторні установки (послідовні реактори) або фільтрокомпенсуючі гілки;
- передбачати контроль температури, струмів та стану конденсаторів для раннього виявлення перевантажень.

Ці заходи мають подвійний ефект: забезпечують як електробезпеку (зниження ймовірності аварійного перегріву/руйнування), так і стабільність режимів мережі.

Контроль температури, вентиляція та експлуатаційний моніторинг

Теплові режими суттєво впливають на ресурс КУ та безпеку. Тому технічні заходи включають:

- забезпечення природної або примусової вентиляції шафи КУ;
- розміщення КУ з урахуванням тепловідводу та допустимих температур навколишнього середовища;
- застосування температурних датчиків/термоконтактів (за необхідності) з сигналізацією або відключенням при перегріві.

4.4. Забезпечення пожежної та вибухобезпеки у приміщеннях електрощитових з КУ

Електрощитові приміщення, в яких розміщуються конденсаторні установки (КУ) для компенсації реактивної потужності, є зонами підвищеної пожежної небезпеки через наявність електрообладнання, струмоведучих частин, комутаційних процесів та можливих аварійних режимів (короткі замикання, перенапруги, перегрів контактів). Додатково для КУ характерні специфічні ризики: високі імпульсні струми вмикання, перевантаження струмами гармонік, локальні теплові перевантаження та можливі відмови конденсаторів (розгерметизація, руйнування, дугові явища у місцях пробою). Тому забезпечення пожежної та вибухобезпеки має розглядатися як комплекс організаційних і технічних заходів, що мінімізують ймовірність займання та обмежують наслідки інцидентів.

Потенційні джерела пожежі та вибухонебезпечні ситуації в електрощитових з КУ

Основні джерела займання та небезпечні сценарії в електрощитових приміщеннях з КУ включають:

1. Перегрів контактних з'єднань і шин. Причинами є послаблення кріплення, окиснення контактів, невідповідність перерізу провідників, перевищення допустимого струму (зокрема за наявності гармонік). Перегрів може призвести до руйнування ізоляції, іскріння та займання кабельних оболонок.

2. Короткі замикання та електрична дуга. Дуга виникає при пробі ізоляції, помилкових перемикаваннях, пошкодженні кабелів, дефектах апаратури. Електрична дуга є джерелом високих температур і може спричинити миттєве займання ізоляції, бризок металу, утворення токсичного диму.

3. Комутаційні перенапруги та імпульсні струми вмикання. При частих перемикаваннях ступенів КУ можливі комутаційні перенапруги, що прискорюють старіння ізоляції та збільшують ризик пробою. Імпульсні

струми вмикання підвищують навантаження на контактори/вимикачі і можуть спричинити зварювання контактів, перегрів та відмову апаратури.

4. Перевантаження конденсаторів струмами гармонік і резонансні явища. Нелінійні споживачі (перетворювачі, зварювання тощо) формують гармоніки, які можуть збільшувати струм через конденсатори і викликати перегрів. У разі резонансу «мережа–КУ» струми та напруги на окремих частотах можуть різко зростати, що створює умови для пробую та пожежі.

5. Аварійне руйнування конденсаторів. При дефектах діелектрика або перенапрузі можливі розгерметизація корпусу, вихід газів, пробій секції та вторинне коротке замикання. У замкнених шафах це може супроводжуватися локальним підвищенням тиску, утворенням дуги, задимленням, а в окремих випадках – механічним пошкодженням елементів шафи.

Вимоги до приміщення електрощитової та розміщення КУ

Зниження пожежного ризику починається з правильного вибору та організації електрощитової:

- Обмеження доступу: приміщення електрощитової має бути службовим, з доступом лише для уповноваженого електротехнічного персоналу.
- Негорючі конструкції та оздоблення: стіни, перегородки та конструктивні елементи повинні виконуватися з матеріалів з низькою горючістю; слід мінімізувати застосування горючих матеріалів в електрощитовій.
- Раціональні проходи та відстані: забезпечення зручних проходів для огляду, обслуговування і евакуації, недопущення захаращення.
- Вентиляція та тепловідведення: у приміщенні має підтримуватися температурний режим, що забезпечує допустимі температури для КУ та комутаційної апаратури; при потребі застосовується примусова вентиляція, фільтрація пилу.
- Пило- та вологозахист: пил є фактором пожежної небезпеки (погіршення охолодження, можливі поверхневі пробіи), а підвищена вологість сприяє трекінгу по ізоляції; необхідний контроль мікроклімату і чистоти.

- Розміщення КУ: КУ повинна встановлюватися на негорючій основі, з дотриманням відстаней для охолодження та доступу до апаратури захисту; не допускається розміщення поряд з легкозаймистими матеріалами, складами, тарами.

Технічні засоби попередження пожеж і локалізації аварійних режимів

Комплекс технічних заходів включає:

1. Електричний захист і селективність. Правильно підібрані автомати/запобіжники, релейний захист (для 6–10 кВ) і захисти перенапруг зменшують тривалість аварійного режиму та енергію дуги, обмежуючи масштаб пошкоджень.

2. Контроль температури та профілактика перегріву. Для пожежної безпеки критичною є профілактика перегрівів: підтягування контактів з регламентованим моментом, тепловізійний контроль, датчики температури в шафі КУ, коректна вентиляція.

3. Захист від гармонік і резонансу. У мережах із нелінійними навантаженнями доцільне застосування детюнованих КУ (послідовні реактори) або фільтрокомпенсуючих пристроїв. Це зменшує ймовірність перегріву конденсаторів і запобігає резонансним режимам, що можуть провокувати аварійні перенапруги.

4. Конструктивна безпека шаф КУ. Шафи повинні мати достатній ступінь захисту оболонки (IP) для умов електрощитової, механічну міцність, можливість відведення тепла. За наявності елементів, що можуть виділяти гази при відмові, важливими є конструктивні рішення, що знижують ризик накопичення продуктів розкладу в замкненому об'ємі.

5. Кабельні траси та протипожежні проходки. Кабельні траси виконуються з дотриманням вимог до прокладання, маркування та захисту. Місця проходу кабелів через стіни/перекриття ущільнюються протипожежними матеріалами, щоб обмежити поширення вогню та диму між приміщеннями.

*Організаційні заходи протипожежного режиму та первинні засоби
пожежогасіння*

Пожежна безпека в електрощитовій забезпечується також організаційними заходами:

- заборона зберігання сторонніх матеріалів, тари, мастил, горючих речовин;
- регулярне прибирання пилу, контроль стану вентиляції;
- ведення журналів огляду, протоколів підтягування контактів, актів вимірювання ізоляції та перевірки захистів;
- інструктажі персоналу щодо дій при задимленні, спрацюванні захисту, появи запаху перегріву.

Первинні засоби пожежогасіння у електрощитових приміщеннях мають відповідати характеру пожеж електрообладнання: застосовуються вогнегасники, придатні для гасіння електроустановок під напругою (до відповідних значень), а також засоби локалізації займання без використання води як основного агента в зоні з електрообладнанням. Порядок гасіння повинен передбачати, що пріоритетною дією є відключення електроживлення з подальшим гасінням у безпечних умовах.

Дії персоналу при пожежонебезпечних ознаках та аварійних ситуаціях

Для мінімізації наслідків інцидентів персонал повинен діяти за відпрацьованим алгоритмом:

- при появі запаху перегріву, диму, нетипових звуків у шафі КУ – негайно відключити установку штатним апаратом, повідомити відповідальних осіб, організувати огляд після витримки часу на розряд;
- при спрацюванні захисту – не вмикати повторно без встановлення причини, виконати огляд контактів, запобіжників, стану конденсаторів, перевірити наявність гармонічних перевантажень;
- при виникненні займання – виконати аварійне відключення, викликати пожежні підрозділи, застосовувати первинні засоби пожежогасіння відповідно до інструкції та не допускати гасіння водою струмоведучих частин під напругою.

4.5. Охорона навколишнього середовища та утилізація елементів КУ

Впровадження конденсаторних установок (КУ) для компенсації реактивної потужності, окрім енергетичного та економічного ефекту, має екологічний аспект. З одного боку, зниження струмів і втрат активної потужності в мережі приводить до непрямого зменшення обсягів виробництва електроенергії та пов'язаних із цим викидів. З іншого боку, КУ є електротехнічним обладнанням, яке в процесі експлуатації та після завершення ресурсу стає відходами електричного й електронного обладнання та потребує організованого поводження з урахуванням вимог екологічної безпеки.

Екологічні аспекти експлуатації КУ

Непрямий екологічний ефект.

Компенсація реактивної потужності зменшує втрати активної електроенергії в елементах мережі (кабелях, трансформаторах), що, в масштабі підприємства та енергосистеми, означає зниження потреби у генерації додаткової електроенергії для покриття втрат. Це опосередковано зменшує викиди парникових газів та інших забруднювачів, пов'язаних із виробництвом електроенергії, а також знижує теплове навантаження на обладнання і, відповідно, частоту аварійних ситуацій.

У нормальному режимі роботи сучасні конденсаторні установки не є джерелом систематичних викидів у довкілля, а основні екологічні питання зводяться до правильного поводження з відпрацьованим обладнанням і запобігання наслідкам аварій.

Вимоги до екологічно безпечної експлуатації та технічного обслуговування

Для забезпечення екологічної безпеки під час експлуатації КУ доцільно впровадити такі підходи:

1. Профілактика аварійних режимів. Регулярні огляди стану конденсаторів (відсутність здуття, підтікання, перегріву), перевірка

контактів, контроль температури, справність захистів і вентиляції зменшують ризик аварійного руйнування та утворення диму/продуктів розкладу.

2. Контроль умов середовища в електрощитовій. Підтримання допустимої температури, вологості та чистоти (мінімізація пилу) підвищує надійність КУ і зменшує ризик інцидентів, що можуть мати локальні екологічні наслідки (задимлення, забруднення).

3. Ведення обліку та безпечне зберігання відпрацьованих компонентів. Відпрацьовані запобіжники, контактори, елементи автоматики, кабельні відрізки та конденсатори повинні збиратися у визначених місцях, з маркуванням і тимчасовим зберіганням відповідно до внутрішніх регламентів підприємства, щоб уникнути змішування з побутовими відходами.

4. Порядок дій при аварійному руйнуванні елементів КУ. У разі задимлення або руйнування конденсатора необхідно: відключити установку, забезпечити провітрювання приміщення, провести огляд та прибирання продуктів руйнування із застосуванням засобів індивідуального захисту, зібрати відходи в герметичну тару для подальшої передачі на утилізацію.

Класифікація відходів та принципи утилізації елементів КУ

Елементи КУ після завершення ресурсу або відмови формують кілька типових потоків відходів:

- Відпрацьовані конденсатори (основний специфічний елемент). Сучасні силові конденсатори, як правило, виготовляються з полімерними діелектриками та імпрегнантами, але в будь-якому разі вони відносяться до електротехнічних відходів, які потребують спеціалізованого поводження.
- Комутаційна апаратура та автоматика (контактори, тиристорні модулі, регулятори, датчики) – відходи електричного та електронного обладнання.
- Запобіжники, автомати, кабелі, шини, металоконструкції – частково придатні до вторинної переробки (металобрухт, мідь/алюміній), але мають бути відокремлені від змішаних відходів.

- Пакувальні матеріали та допоміжні витратні матеріали (кріплення, ізоляційні матеріали, стяжки) – утилізуються відповідно до внутрішніх процедур підприємства.

Принциповими вимогами екологічно коректної утилізації є:

1. Роздільний збір відходів за групами (електрообладнання, метал, кабель, змішані).

2. Виключення несанкціонованого демонтажу конденсаторів та їх розкриття, оскільки це може призвести до потрапляння продуктів руйнування/імпрегнанту в навколишнє середовище.

3. Передача відходів ліцензованим операторам або організаціям, які мають право на збирання, оброблення та утилізацію відходів електричного й електронного обладнання.

4. Документальне підтвердження передачі відходів (акти приймання-передачі, накладні), що важливо і з позиції екологічного контролю, і з позиції системи менеджменту підприємства.

Експлуатація конденсаторних установок характеризується переважно непрямим позитивним екологічним ефектом, оскільки зниження втрат електроенергії сприяє зменшенню потреби в генерації та пов'язаних із нею викидів. Основні екологічні ризики пов'язані не з роботою КУ в штатному режимі, а з утворенням відпрацьованих компонентів та можливими аварійними відмовами. Екологічно безпечне поводження з КУ забезпечується профілактикою аварій, контролем умов в електрощитовій, роздільним збиранням відходів, організованим тимчасовим зберіганням та передачею відпрацьованого обладнання на утилізацію ліцензованим організаціям.

4.6. Висновки

1. Експлуатація електроустановок і конденсаторних установок належить до робіт підвищеної небезпеки, тому безпечне виконання робіт має забезпечуватися поєднанням організаційних і технічних заходів (допуск,

компетентність персоналу, блокування/огородження, захисти), а також дотриманням чинної нормативно-правової бази та внутрішніх інструкцій підприємства.

2. Під час монтажу та експлуатації КУ ключовими ризиками є ураження струмом (у т.ч. через наведені напруги), небезпека залишкового заряду, дугові явища й КЗ, механічний травматизм та пожежні ризики, що посилюються комутаційними процесами й гармонічними перевантаженнями; додатково впливають шкідливі фактори середовища (ЕМП, шум/вібрація, мікроклімат).

3. Електробезпека при застосуванні КУ забезпечується комплексом технічних рішень (заземлення/вирівнювання потенціалів, захисти від КЗ і перенапруг, організація розряду та контроль відсутності напруги, блокування й огородження), а також спеціальними заходами проти імпульсних струмів і гармонік (детюнування/фільтрація) та контролем теплового режиму (вентиляція, моніторинг).

4. Зниження пожежо- та вибухонебезпеки в електрощитових з КУ досягається системним управлінням ризиками (усунення причин перегріву контактів, КЗ, перенапруг і резонансів), правильними вимогами до приміщення та розміщення обладнання, впровадженням селективних захистів/контролю температури, організаційним протипожежним режимом, наявністю додатних засобів пожежогасіння та чіткими алгоритмами дій персоналу.

5. КУ мають переважно непрямий позитивний екологічний ефект через зменшення втрат електроенергії, водночас екологічна безпека забезпечується профілактикою аварій і правильною системою поводження з відпрацьованими компонентами (облік, роздільний збір, безпечне зберігання, передача ліцензованим операторам з документальним підтвердженням).

ВИСНОВКИ

1. Перетікання реактивної потужності в системі електропостачання спричиняє зростання струмів в лініях і трансформаторах, збільшення втрат активної енергії, погіршення режимів напруги та «зайве» завантаження мережевих елементів, тому компенсація реактивної потужності є технічно та економічно обґрунтованим інструментом підвищення ефективності електропостачання.

2. Показано, що для більшості внутрішньозаводських мереж практично доцільним засобом компенсації є конденсаторні установки (особливо ступеневі автоматичні), які забезпечують підвищення $\cos\varphi$ та зменшення втрат за помірних капітальних витрат.

3. Нормативна складова розглянута як ключова «зв'язка» між режимними розрахунками та економічним ефектом: вимоги щодо мінімізації перетікань реактивної потужності та наявність механізмів плати/розрахунків за реактивну електроенергію підсилюють економічну мотивацію впровадження КУ.

4. Обґрунтовано доцільність урахування впливу напруги на величину реактивної потужності, яку генерують конденсаторні батареї, оскільки за відхилень напруги виникають ризики недокомпенсації (при заниженій напрузі) або перекомпенсації (при підвищеній), що може формувати небажані режими в мережі.

5. Реактивна потужність батареї конденсаторів є квадратичною функцією напруги, що є визначальним при виборі ступенів КУ та перевірці режимів напруги у вузлах приєднання.

6. Сформульовано задачу оптимізації розміщення КУ в мережі споживача як пошук місць установлення та потужностей, що мінімізують цільову функцію приведених витрат з урахуванням капіталовкладень, експлуатаційних витрат та вартості втрат, із дотриманням обмежень за потужностями КУ і напругами у вузлах; як метод пошуку мінімуму застосовано великокроковий градієнтний підхід.

7. Для коректного відображення капіталовкладень у КУ використано емпіричну залежність вартості від потужності, яка зберігає неперервність і забезпечує граничну властивість ($K \rightarrow 0$) при ($Q \rightarrow 0$); показано, що наявність «кромки» графіка може породжувати додаткові локальні мінімуми, що слід враховувати під час оптимізації.

8. На прикладі промислового підприємства продемонстровано, що оптимізація компенсації реактивної потужності приводить до істотного зниження значення цільової функції (порівняно з режимом «до оптимізації») та зменшення складових витрат, пов'язаних із втратами.

9. Техніко-економічний розрахунок підтвердив ефективність впровадження КУ: додаткові капіталовкладення становлять 193335,69 грн, зниження вартості втрат – майже у 3,5 рази, а термін окупності – 3,8 року, що є прийнятним для промислових умов.

10. У розділі з охорони праці визначено, що експлуатація електроустановок із КУ належить до робіт підвищеної небезпеки та вимагає додаткових заходів безпечної комутації, контролю перенапруг, відведення тепла й недопущення доступу до струмоведучих частин, що є обов'язковою умовою практичного впровадження рішень з компенсації реактивної потужності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [`https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19`](https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19) (дата звернення: 19.12.2025).

2. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [`https://zakon.rada.gov.ua/go/v0312874-18`](https://zakon.rada.gov.ua/go/v0312874-18) (дата звернення: 19.12.2025).

3. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [`https://zakon.rada.gov.ua/go/v0310874-18`](https://zakon.rada.gov.ua/go/v0310874-18) (дата звернення: 19.12.2025).

4. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: Наказ Міненерговугілля України від 06.02.2018 № 87 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [`https://zakon.rada.gov.ua/go/z0392-18`](https://zakon.rada.gov.ua/go/z0392-18) (дата звернення: 19.12.2025).

5. Про затвердження Правил улаштування електроустановок : Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [`https://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17`](https://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17) (дата звернення: 19.12.2025).

6. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). URL: [`https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226`](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226) (дата звернення: 19.12.2025).

7. ДСТУ EN 60831-1:2018. Конденсатори силові шунтувальні самовідновного типу для систем змінного струму на номінальну напругу до 1000 В включно. Частина 1. Загальні положення... URL: [`https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81721`](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81721) (дата звернення: 19.12.2025).

8. ДСТУ EN 60871-1:2022. Конденсатори шунтувальні для систем живлення змінного струму на номінальну напругу вище 1000 В. Частина 1. Загальні положення. URL: [`https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=100446`](https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=100446) (дата звернення: 19.12.2025).

9. ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 3-2. Норми. Норми емісії гармонійних складників струму... URL: [`https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83987`](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83987) (дата звернення: 19.12.2025).

10. ДСТУ 3122-95. Установки для компенсації реактивної потужності конденсаторні. Терміни та визначення. URL: [`https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60107`](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60107) (дата звернення: 19.12.2025).

11. Міліх В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств : підручник. Київ : Каравела, 2018. 272 с.

12. Василега П. О. Електропостачання: навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2019. 415 с.

13. Кучанський В., Кошман В., Шевчук В., Сабарно Л. Сучасні вимоги до компенсування реактивної потужності в магістральних електричних мережах // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2025. Vol. 357, No. 5.1. P. 284–290. DOI: 10.31891/307-5732-2025-357-36.

14. Сіріков О.І., Панасенко С.М. Оптимізація режимів реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств. Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018): міжнародна науково-практична інтернет-конференція м. Кропивницький, 15-16 листопада 2018 р., – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2018. – С. 113-114.

Додаток А

Апроксимація вартості низьковольтних конденсаторних установок за лінійною залежністю

data :=

	0	1
0	0	0
1	20	700.8
2	25	732.7
3	30	774.9
4	35	799.7
5	40	810.9
6	45	877.9
7	50	923.7
8	55	945.4
9	60	998.8
10	70	1155.6
11	80	1285.2
12	90	1365.3
13	100	1429.9
14	120	1592.2
15	140	1749
16	160	1832.3
17	180	1982
18	200	2108.4
19	220	2502.7
20	240	2643.8
21	260	2804
22	280	3054.6
23	300	3443.3
24	320	3568.2
25	360	3856.2
26	400	4012.5
27	420	4713.3
28	425	4745.2
29	430	4787.4
30	435	4812.2
31	440	4823.4
32	445	4890.4
33	450	4936.2
34	455	4957.9
35	460	5011.3
36	470	5168.1
37	480	5297.7
38	490	5377.8
39	500	5442.4
40	520	5604.7
41	540	5761.5
42	560	5844.8
43	580	5994.5
44	600	6120.9
45	620	6515.2
46	640	6656.3
47	660	6816.5
48	680	7067.1
49	700	7455.8
50	720	7580.7
51	760	7868.7
52	800	8025
53	0	0
54		

$$D(K) := \sum_{i=1}^{52} \frac{(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K)^2}{(\text{data}_{i,1})^2}$$

$$K := 0$$

$$\text{Minimize}(D, K) = 11.586$$

$$K := 11.586$$

$$P := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{52} \left[\frac{(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K) \cdot 100}{\text{data}_{i,1}} \right]^2}{52}}$$

Значення середньоквадратичної похибки, %

$$P = 22.301$$

data :=

	0	1
0	0	0
1	20	700.8
2	25	732.7
3	30	774.9
4	35	799.7
5	40	810.9
6	45	877.9
7	50	923.7
8	55	945.4
9	60	998.8
10	70	1155.6
11	80	1285.2
12	90	1365.3
13	100	1429.9
14	120	1592.2
15	140	1749
16	160	1832.3
17	180	1982
18	200	2108.4
19	220	2502.7
20	240	2643.8
21	260	2804
22	280	3054.6
23	300	3443.3
24	320	3568.2
25	360	3856.2
26	400	4012.5
27	420	4713.3
28	425	4745.2
29	430	4787.4
30	435	4812.2
31	440	4823.4
32	445	4890.4
33	450	4936.2
34	455	4957.9
35	460	5011.3
36	470	5168.1
37	480	5297.7
38	490	5377.8
39	500	5442.4
40	520	5604.7
41	540	5761.5
42	560	5844.8
43	580	5994.5
44	600	6120.9
45	620	6515.2
46	640	6656.3
47	660	6816.5
48	680	7067.1
49	700	7455.8
50	720	7580.7
51	760	7868.7
52	800	8025
53	0	0

$$D(K, d) := \sum_{i=1}^{52} \frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right)^2}{\left(\text{data}_{i,1} \right)^2}$$

$$K := 0 \quad d := 0$$

$$\text{Minimize}(D, K, d) = \begin{pmatrix} 8.652 \\ 191.359 \end{pmatrix}$$

$$K := 8.652$$

$$d := 191.359$$

$$P := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{52} \left[\frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right) \cdot 100}{\text{data}_{i,1}} \right]^2}{52}}$$

Значення середньоквадратичної похибки, %

$$P = 5.957$$

Апроксимація вартості низьковольтних конденсаторних установок за
емпіричною залежністю для одного типу

data :=

	0	1
0	0	0
1	20	700.8
2	25	732.7
3	30	774.9
4	35	799.7
5	40	810.9
6	45	877.9
7	50	923.7
8	55	945.4
9	60	998.8
10	70	1155.6
11	80	1285.2
12	90	1365.3
13	100	1429.9
14	120	1592.2
15	140	1749
16	160	1832.3
17	180	1982
18	200	2108.4
19	0	0

$$D(K, d) := \sum_{i=1}^{18} \frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right)^2}{\left(\text{data}_{i,1} \right)^2}$$

K := 0

d := 0

$$\text{Minimize}(D, K, d) = \begin{pmatrix} 6.08 \\ 246.479 \end{pmatrix}$$

K := 6.08

d := 246.479

$$P := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{18} \left[\frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right) \cdot 100}{\text{data}_{i,1}} \right]^2}{18}}$$

Значення середньоквдратичної похибки %

P = 4.109

Додаток Б

Апроксимація вартості високовольтних конденсаторних установок за емпіричною залежністю

data :=

	0	1
0	0	0
1	150	48144
2	300	54672
3	400	57698
4	450	62594
5	600	77180
6	750	79662
7	900	68068
8	1050	1.054·10 ⁵
9	1200	1.117·10 ⁵
10	1350	1.142·10 ⁵
11	1500	1.343·10 ⁵
12	1800	1.131·10 ⁵
13	2100	1.641·10 ⁵
14	2250	1.662·10 ⁵
15	2400	1.862·10 ⁵
16	2700	1.992·10 ⁵
17	3150	2.289·10 ⁵
18	3600	2.539·10 ⁵
19	0	...

$$D(K, d) := \sum_{i=1}^{18} \frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right)^2}{\left(\text{data}_{i,1} \right)^2}$$

$$K := 0 \quad d := 0$$

$$\text{Minimize}(D, K, d) = \begin{pmatrix} 43.969 \\ 9.302 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$K := 43.969$$

$$d := 9.302 \times 10^3$$

$$P := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{18} \left[\frac{\left(\text{data}_{i,1} - \text{data}_{i,0} \cdot K - d \cdot \sqrt[4]{\text{data}_{i,0}} \right) \cdot 100}{\text{data}_{i,1}} \right]^2}{18}}$$

Значення середньо квадратичної похибки %

$$P = 11.781$$