

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:
«Визначення оптимального рівня компенсації
реактивної потужності в електричних мережах
споживачів
Determination of the optimal level of reactive power
compensation in consumer electrical networks»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Максим ТКАЧЕНКО
«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____ Олександр СІРІКОВ
«__» _____ 2025 р.

Рецензент _____

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**

Ткаченка Максима Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів

Determination of the optimal level of reactive power compensation in consumer electrical networks

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 05.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів.

Завдання роботи: реактивна потужність в електричних мережах (причини появи реактивної потужності, способи зменшення споживання реактивної потужності, компенсація реактивної потужності); постановка задачі визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів; розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для деяких типових графіків підприємств; 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>Реактивна потужність в електричних мережах (причини появи реактивної потужності, способи зменшення споживання реактивної потужності, компенсація реактивної потужності)</i>	<i>17.10.25</i>	
3	<i>Постановка задачі визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів</i>	<i>31.10.25</i>	
4	<i>Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для деяких типових графіків підприємств</i>	<i>14.11.25</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>21.11.25</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>28.11.25</i>	
7	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>	<i>05.12.25</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Ткаченко М.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ткаченко М. В. Визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів.

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.

В магістерській роботі досліджено проблему визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів. Розглянуто фізичні причини появи реактивної потужності, її вплив на режими роботи мережі та економічні наслідки для промислових підприємств. Запропоновано методику визначення оптимального рівня компенсації на основі мінімізації сумарних приведених витрат, що включають плату за споживання реактивної електроенергії та інвестицій у компенсуючі пристрої. На основі типових графіків навантаження для підприємств різних галузей побудовано залежності річних витрат на оплату перетікання реактивної енергії від ступеня компенсації та приведених річних витрат на конденсаторні установки, аналітично встановлені раціональні рівні компенсації. Проведено дослідження впливу вартості електричної енергії на глибину компенсації, яке продемонструвало, що навіть істотне зниження тарифу на електроенергію не змінює загальної тенденції: оптимальною залишається глибока компенсація. Аналіз впливу терміну окупності капітальних вкладень показав, що скорочення терміну повернення інвестицій хоча і підвищує приведені витрати на обладнання, однак оптимальною залишається повна компенсація реактивної потужності.

Робота має практичне значення для проєктування та модернізації систем електропостачання промислових об'єктів.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація, конденсаторні установки, приведені витрати, оптимізація, коефіцієнт потужності, графік навантаження, плата за реактивну енергію, промислові споживачі.

ABSTRACT

Tkachenko M. V. Determination of the optimal level of reactive power compensation in consumer electrical networks

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 master's thesis investigates the problem of determining the optimal level of reactive power compensation in consumer electrical networks. The physical causes of reactive power, its impact on network operation modes, and economic consequences for industrial enterprises are considered. A methodology for determining the optimal level of compensation based on minimizing total current costs, including payment for reactive power consumption and investments in compensating devices, is proposed. Based on typical load schedules for enterprises in various industries, the dependences of annual costs for payment for reactive power flow on the degree of compensation and current annual costs for capacitor installations are constructed, and rational compensation levels are analytically established. A study of the impact of the cost of electric energy on the depth of compensation was conducted, which demonstrated that even a significant reduction in the electricity tariff does not change the general trend: deep compensation remains optimal. An analysis of the impact of the payback period of capital investments showed that although reducing the investment payback period increases the current costs for equipment, full compensation of reactive power remains optimal.

The work has practical significance for the design and modernization of power supply systems for industrial facilities.

Key words: reactive power, compensation, capacitor banks, reduced costs, optimization, power factor, load schedule, reactive power charge, industrial consumers.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ...	10
1.1 Причини появи реактивної потужності.....	10
1.2 Споживачі реактивної потужності в електричних мережах.	12
1.3 Способи зменшення споживання реактивної потужності.....	15
1.4 Компенсація реактивної потужності	19
1.5 Висновки.....	21
РОЗДІЛ 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ.....	22
2.1 Визначення рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів при проектуванні	22
2.2 Оплата за споживання реактивної енергії.....	24
2.3 Приведені витрати на компенсуючі пристрої.....	26
2.4 Постановка задачі оптимізації.....	27
2.5 Висновки.....	28
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ДЕЯКИХ ТИПОВИХ ГРАФІКІВ ПІДПРИЄМСТВ	29
3.1 Методика визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності	29
3.2 Приведені річні витрати на компенсуючі пристрої	31
3.3 Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії	33

3.4 Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для підприємства верстатобудівної промисловості	45
3.5 Аналіз впливу вартості електричної енергії на рівень компенсації реактивної потужності.....	62
3.6 Аналіз впливу терміну окупності на рівень компенсації реактивної потужності	67
3.7 Висновки.....	69
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	73
4.1 Організаційні та правові засади електробезпеки на підприємстві	73
4.2 Основні причини електротравматизму.....	75
4.3 Наслідки ураження електричним струмом	80
4.4 Дії в аварійних ситуаціях, перша допомога при ураженні електрострумом.....	82
4.5 Розрахунок захисного заземлення	84
4.6 Висновки.....	87
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	91

ВСТУП

Сучасний розвиток електроенергетичних систем характеризується зростанням частки нелінійних та індуктивних споживачів, що призводить до істотного збільшення перетоків реактивної потужності в мережах промислових підприємств. Наявність реактивної складової спричиняє додаткові втрати активної енергії, перевантаження трансформаторів і кабельних ліній, зниження рівня напруги та економічні збитки через оплату за надлишкове споживання реактивної електроенергії. Тому питання підвищення енергоефективності шляхом оптимізації компенсації реактивної потужності є надзвичайно актуальним як для нових, так і для існуючих електричних мереж. У роботі розглянуто методологію визначення оптимального рівня компенсації, що забезпечує мінімізацію сумарних витрат підприємства з урахуванням режимів навантаження, вартості компенсуючих пристроїв та чинної системи тарифікації за реактивну енергію.

Актуальність теми. Проблема надмірного споживання реактивної електроенергії залишається однією з ключових у підвищенні енергоефективності промислових підприємств. Зростання тарифів, поява сучасних компенсуючих пристроїв та посилення нормативних вимог потребують науково обґрунтованого визначення економічно доцільного рівня компенсації реактивної потужності.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Дослідити способи зменшення споживання реактивної потужності та сучасні методи її компенсації.
2. Розробити підхід до оцінювання приведених витрат на компенсуючі пристрої.

3. Сформувати математичну модель визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності.

4. Провести розрахунок оптимального рівня компенсації для типових графіків навантаження промислових підприємств.

Об'єкт дослідження – процеси виробництва, передачі, розподілу та споживання реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств.

Предмет дослідження – методи, математичні моделі та техніко-економічні підходи до визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів.

Науково-практична новизна магістерської роботи полягає у вдосконаленні підходів до визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів на основі комплексного поєднання техніко-економічних, режимних та аналітичних розрахунків. У роботі запропоновано узагальнену методика вибору потужності компенсуючих пристроїв, яка враховує фактичні графіки навантаження підприємств різного типу, реальні тарифні умови та приведені витрати протягом життєвого циклу обладнання.

Практична цінність отриманих результатів полягає у тому, що отримана нова методика для визначення оптимального значення $\text{tg}\varphi$ на основі аналітичних залежностей, що мінімізує сумарні річні витрати споживача, включаючи плату за перетікання реактивної енергії та приведені витрати на компенсуюче обладнання.

РОЗДІЛ 1

РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Причини появи реактивної потужності

Реактивна потужність є невід'ємною складовою процесів перетворення та передачі електричної енергії в системах змінного струму. На відміну від активної потужності, яка виконує корисну роботу, реактивна потужність не споживається кінцевими навантаженнями, але забезпечує створення та підтримання електромагнітних полів в елементах електроенергетичних систем. Її поява пов'язана з фізичними особливостями роботи індуктивних та ємнісних елементів, а також з характером споживачів електричної енергії.

1. Електромагнітні властивості індуктивних елементів.

Основною причиною виникнення реактивної потужності є наявність індуктивності у споживачів та ліній електропередачі. Будь-який індуктивний елемент (котушка, трансформатор, електродвигун тощо) для своєї роботи потребує створення змінного магнітного поля.

Формування цього поля вимагає енергії, яка періодично накопичується в магнітному полі та повертається до джерела. Такий обмін енергією відбувається протягом кожного періоду мережевої напруги і не призводить до виконання корисної роботи. У математичному вираженні це проявляється як зсув фаз між струмом і напругою, що безпосередньо формується індуктивністю.

2. Ємнісні властивості елементів електричних мереж.

Певну частину реактивної потужності створюють ємнісні елементи, хоча їх вплив зазвичай менший порівняно з індуктивними навантаженнями. Ємнісні елементи (кабелі, конденсатори, довгі повітряні лінії) накопичують енергію в електричному полі. Процеси заряджання та розряджання також не супроводжуються виконанням корисної роботи та спричиняють появу реактивної потужності, але з протилежним знаком порівняно з індуктивністю.

3. Особливості роботи електричних машин та обладнання.

Більшість промислових механізмів – асинхронні та синхронні двигуни, трансформатори, дроселі – за своєю природою є індуктивними споживачами. Для створення магнітного потоку в цих машинах необхідна значна кількість реактивної енергії.

Наприклад, асинхронний двигун потребує реактивної потужності для створення магнітного поля статора. Це зумовлює відставання струму від напруги, що, в свою чергу, спричиняє передачу реактивної потужності від мережі до двигуна.

4. Характер ліній електропередачі.

Лінії електропередачі високої напруги мають розподілену індуктивність і ємність, що також веде до утворення реактивної складової. Індуктивність викликає потребу в додатковій реактивній потужності, тоді як ємність – навпаки, генерує її. Співвідношення цих величин визначає характер режиму мережі: індуктивний або ємнісний.

На практиці довгі повітряні лінії можуть генерувати надлишкову ємнісну реактивну потужність у режимі малих навантажень, що потребує спеціального регулювання.

5. Нелінійність та імпульсні режими роботи навантаження.

Сучасні електроприймачі, зокрема перетворювачі частоти, імпульсні блоки живлення, тиристорні регулятори, створюють спотворення форми струму. Гармонічні складові такого струму впливають на баланс потужності в мережі та призводять до появи додаткової реактивної компоненти, пов'язаної не лише зі зсувом фаз, а й зі спотворенням форми хвилі.

6. Неідеальність джерел живлення.

Джерела електричної енергії (генератори, перетворювачі, інвертори) мають власні індуктивності та неоднорідності, що створюють внутрішній фазовий зсув між напругою та струмом. Це також викликає циркуляцію реактивної потужності всередині системи.

Некомпенсована реактивна потужність призводить до низки негативних наслідків, які й обумовлюють актуальність вашої роботи:

– *Збільшення втрат активної потужності.* Збільшення повного струму, необхідного для передачі не лише активної, а й реактивної енергії, призводить до зростання втрат активної потужності.

– *Зниження пропускної спроможності.* Реактивний струм займає частину потужності трансформаторів та ліній, тим самим завантажуючи їх додатково.

– *Зниження якості електроенергії.* Зміна перетоків реактивної потужності призводить до підвищення або зниження напруги у вузлах електричної мережі.

– *Економічні штрафи або плата за споживання реактивної потужності і енергії.* Постачальники електроенергії накладають штрафи на споживачів, які мають низький $\cos\phi$ (зазвичай нижче 0,9–0,92).

Отже, основна причина появи реактивної потужності – це потреба індуктивних навантажень у створенні магнітних полів, що вимагає постійного обміну енергією з джерелом. Цей обмін енергією і є **реактивною потужністю**.

1.2 Споживачі реактивної потужності в електричних мережах.

1. Асинхронні електродвигуни (АД).

Асинхронні двигуни є найбільшим споживачем РП, оскільки вони становлять до 60–80% всього електричного навантаження на промислових підприємствах.

Реактивна потужність необхідна для намагнічування феромагнітних сердечників статора та ротора. Це створює обертове магнітне поле, яке індукуює струми в обмотках ротора, забезпечуючи крутний момент.

Недовантажені АД споживають відносно більше РП, ніж активної. Це відбувається тому, що потужність, необхідна для намагнічування (реактивна

складова), залишається майже незмінною незалежно від механічного навантаження на валу, тоді як активна потужність (для роботи) зменшується.

Наприклад, коефіцієнт потужності $\cos\phi$ повністю навантаженого АД може становити 0,85–0,9. А при холостому ході $\cos\phi$ може знижуватися до 0,2–0,3.

2. Силові трансформатори.

Трансформатори є критично важливими елементами електричної мережі, які також є постійними споживачами РП.

Реактивна потужність витрачається на створення робочого магнітного потоку в магнітопроводі (сердечнику). Ця потужність є намагнічувальною і називається потужністю холостого ходу трансформатора (ΔQ_{xx}).

1. Реактивна потужність холостого ходу ΔQ_{xx} необхідна для намагнічування. Споживається постійно, незалежно від навантаження.

2. Реактивна потужність короткого замикання $\Delta Q_{кз}$ витрачається на подолання опору розсіювання обмоток при передачі потужності навантаженню. Зростає пропорційно квадрату струму навантаження.

Як і у двигунів, трансформатори мають найбільше відносне споживання РП при недовантаженні, оскільки ΔQ_{xx} залишається постійним.

3. Електрозварювальне обладнання.

Зварювальні трансформатори та агрегати, особливо ті, що не мають спеціальних пристроїв для корекції $\cos\phi$, є потужними, але часто імпульсними споживачами РП.

Зварювальний струм має високу індуктивність через необхідність створення стабільної дуги та велику індуктивність обмоток. Коефіцієнт потужності зварювального обладнання може бути дуже низьким (0,4–0,6).

Застосування сучасних інверторних зварювальних апаратів виправляє цю ситуацію, особливо обладнаних спеціальною схемою корекції коефіцієнта потужності. Натомість, частка трансформаторних зварювальних апаратів ще і досі залишається значною, хоча і має тенденцію до стрімкого зменшення останнім часом.

4. Електричні печі (дугові та індукційні).

Дугові сталеплавильні печі характеризуються нестабільним і різко змінним індуктивним навантаженням. Їхній $\cos\phi$ низький, особливо на стадії плавлення.

Індукційні печі використовують електромагнітне поле для нагріву, що за своєю суттю є індуктивним процесом і вимагає значної реактивної потужності.

5. Пристрої освітлення.

Традиційні люмінесцентні та газорозрядні лампи використовують електромагнітні пускорегулювальні апарати (ПРА), які складаються з дроселю (індуктивності) для обмеження струму, які споживають РП. Хоча сучасні електронні баласты (ЕПРА) значно покращують $\cos\phi$, у старих мережах це все ще актуальна проблема.

6. Пристрої регулювання.

Обмотки контакторів, реле, електромагнітів і соленоїдів, необхідні для автоматизації, є індуктивними та потребують РП для створення магнітного тяжіння.

7. Повітряні та кабельні лінії електропередачі (ЛЕП).

Навіть якщо відключити всі кінцеві споживачі, сама розподільча мережа продовжуватиме споживати індуктивну РП.

Кожен провідник має власний індуктивний опір X_L . Реактивна потужність витрачається на створення магнітного поля навколо провідників при проходженні струму. Споживана лініями РП прямо пропорційна квадрату струму, що протікає через них. Зі зростанням довжини лінії та струму зростає і споживання РП.

Інтенсивне споживання РП в ЛЕП та трансформаторах викликає падіння напруги. Компенсація РП безпосередньо у місцях її споживання (біля потужних двигунів або на шинах трансформаторів) дозволяє розвантажити елементи мережі та стабілізувати напругу.

1.3 Способи зменшення споживання реактивної потужності

Зменшення споживання реактивної потужності є важливою складовою підвищення енергоефективності електроенергетичних систем. Надлишок реактивної складової призводить до зростання струмів у мережі, додаткових втрат у лініях і трансформаторах, зниження пропускної здатності обладнання та погіршення якості електроенергії. Оптимізація споживання реактивної потужності здійснюється за допомогою низки технічних, організаційних і системних заходів.

Технічні засоби зменшення споживання реактивної потужності

1. Компенсація реактивної потужності конденсаторними установками.

Найпоширенішим способом зниження індуктивної реактивної потужності є встановлення конденсаторних батарей або конденсаторних установок. Принцип їх роботи ґрунтується на генерації ємнісної реактивної потужності, яка частково або повністю компенсує індуктивну складову навантаження. Види конденсаторних установок:

Індивідуальні – встановлюються безпосередньо на споживачі (наприклад, на клеммах електродвигуна).

Групові – розміщуються для групи однотипних механізмів, що працюють з подібним режимом навантаження.

Централізовані – встановлюються на шинах розподільчого пристрою підприємства.

2. Використання синхронних двигунів та компенсаторів.

Синхронні двигуни, що працюють у режимі перезбудження, можуть генерувати реактивну потужність, компенсуючи індуктивну складову мережі. А синхронний двигун, який не має механічного навантаження постійно працюючи в режимі холостого ходу та використовується лише для генерації РП називається синхронний компенсатор.

3. Статичні синхронні компенсатори (STATCOM / СТАТКОМ).

СТАТКОМ (Static Synchronous Compensator) – це сучасні силові електронні пристрої, здатні динамічно компенсувати реактивну потужність

шляхом швидкого керування струмом інвертора. Він використовує інвертор напруги для генерування або споживання реактивної потужності. Один із найсучасніших засобів компенсації.

4. Статичні тиристорні компенсатори (TSC/TCR).

Системи на основі тиристорів дозволяють швидко змінювати величину компенсації, підключаючи чи відключаючи конденсаторні ступені.

Огляд переваг та недоліків розглянутих технічних засобів зменшення споживання реактивної потужності наведений в табл. 1.1.

Технічні способи зменшення споживання реактивної потужності

1. Оптимізація режимів роботи електродвигунів.

Більшість реактивної потужності на промислових підприємствах споживають асинхронні двигуни. Значна її частина виникає внаслідок роботи двигунів у недовантаженому режимі.

Заходи оптимізації:

- Відключення «холостих ходів» двигунів.
- Підбір двигуна відповідно до реального навантаження.
- Використання двигунів із покращеними енергетичними характеристиками (IE3, IE4).
- Перехід на синхронні двигуни у відповідальних агрегатах.

2. Використання сучасних перетворювачів частоти.

Перетворювачі частоти з активним фронтом випрямлення (Active Front End) дозволяють зменшити реактивну потужність, оскільки вони споживають струм, близький до синусоїдального, без значного зсуву фаз.

Переваги:

- Підвищення коефіцієнта потужності до 0,95–1.
- Зменшення спотворень струму.
- Економія енергії під час регулювання швидкості обертання.

3. Правильне проектування та модернізація електричних мереж.

Системний підхід до проектування мереж дозволяє істотно скоротити реактивні втрати.

Таблиця 1.1. Аналітичний огляд засобів компенсації РП

Засіб КРП	Переваги	Недоліки
Конденсаторні установки	<p>Низька вартість і простота експлуатації.</p> <p>Можливість автоматичного регулювання залежно від навантаження.</p> <p>Підвищення напруги в мережі та зменшення втрат.</p>	<p>Не працюють за наявності значних гармонік у мережі.</p> <p>Потребують захисту від перенапруг.</p> <p>Мають відносно обмежений строк служби.</p>
Синхронні двигуни та компенсатори	<p>Плавне й широке регулювання реактивної потужності.</p> <p>Підвищення стійкості енергосистеми.</p> <p>Фільтрація частини гармонічних складових.</p>	<p>Висока вартість і складність обслуговування.</p> <p>Додаткові втрати на механічне тертя.</p> <p>Потреба в окремій інфраструктурі запуску.</p>
Статичні синхронні компенсатори (STATCOM)	<p>Миттєва реакція при зміні навантаження.</p> <p>Висока ефективність у мережах з великою кількістю нелінійних споживачів.</p> <p>Здатність працювати як джерело, так і споживач реактивної потужності.</p> <p>Зменшення флікера та стабілізація напруги.</p>	<p>Значна початкова вартість.</p> <p>Необхідність систем охолодження.</p> <p>Високі вимоги до кваліфікації персоналу.</p>
Статичні тиристорні компенсатори (TSC/TCR)	<p>Висока швидкодія (10–20 мс).</p> <p>Придатність для динамічних навантажень (зварювальні апарати, крани).</p> <p>Стабілізація напруги.</p>	<p>Складність конструкції.</p> <p>Потреба у фільтрації гармонік.</p> <p>Висока вартість.</p>

Основні заходи:

- Мінімізація довжини кабельних ліній.
- Використання кабелів оптимального перерізу (щоб уникнути надмірної ємності).
- Заміна старих трансформаторів на енергоефективні з меншими індуктивними втратами.
- Розподіл навантаження між трансформаторами для уникнення їх недовантаження.

4. Балансування фаз.

У трифазних мережах дисбаланс фаз збільшує циркуляцію реактивної потужності та знижує ефективність обладнання.

Методи балансування:

- Перерозподіл однофазних навантажень.
- Використання автоматичних балансувальних систем.
- Впровадження трансформаторів із регулюванням під навантаженням.

5. Зменшення впливу гармонічних спотворень.

Гармоніки збільшують уявну потужність, а отже і погіршують коефіцієнт потужності. Способи боротьби з гармоніками:

- Активні та пасивні фільтри гармонік.
- Використання обладнання зі зниженим рівнем спотворень (low harmonic drives).
- Розділення нелінійних та лінійних навантажень між різними трансформаторами.

6. Організаційні та експлуатаційні заходи.

Навіть без великих капіталовкладень можна істотно зменшити споживання реактивної потужності. Приклади: контроль коефіцієнта потужності підприємства, регулярні енергоаудити, встановлення автоматизованих систем контролю й обліку електроенергії (АСКОЕ), профілактика та обслуговування обладнання для уникнення перевантажень і асиметрій.

1.4 Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності є одним із ключових методів підвищення енергоефективності електроенергетичних систем. Її суть полягає в зменшенні або повному усуненні потреби споживачів у реактивній енергії за допомогою пристроїв, які генерують реактивну потужність з протилежним знаком. Це дозволяє мінімізувати навантаження на джерела живлення, лінії електропередачі та трансформатори, зменшувати втрати потужності й покращувати якість електроенергії.

Принцип компенсації реактивної потужності

У більшості випадків електричне навантаження в промислових і комунальних мережах має індуктивний характер. Такі споживачі (електродвигуни, трансформатори, дроселі) потребують створення магнітного поля, що призводить до відставання струму від напруги на певний кут. Для зменшення цього струму необхідно компенсувати індуктивну реактивну потужність за допомогою споживачів або генераторів «ємнісної» реактивної потужності. В ідеалі результатом компенсації є коефіцієнт потужності, близький до одиниці $\cos\varphi \rightarrow 1$.

Основними завданнями компенсації є:

1. Зниження втрат у мережі. Зменшення реактивної складової зменшує струм, що протікає через кабелі та трансформатори, що скорочує втрати I^2R .
2. Підвищення пропускної здатності електромереж. Звільнення частини «струмового ресурсу» дає можливість передавати більшу активну потужність без модернізації обладнання.
3. Підвищення рівня напруги у мережі. Зменшення падіння напруги в лініях завдяки зменшенню загального струму.
4. Покращення коефіцієнта потужності. Досягнення нормативного рівня, передбаченого стандартами ($\cos \varphi \geq 0,9$).
5. Зниження штрафів або плати за реактивну енергію для споживачів. У багатьох енергопостачальних компаніях перевищення ліміту реактивної енергії призводить до додаткових платежів.

Критерії вибору засобів компенсації

Під час вибору обладнання для компенсації реактивної потужності враховують:

- рівень і характер навантаження (статичне чи динамічне);
- величину необхідної компенсації;
- наявність гармонік у мережі;
- місце встановлення;
- економічні показники (термін окупності);
- вимоги до швидкодії.

Реактивну потужність, яку необхідно компенсувати можна знайти за формулою:

$$Q_c = P (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2),$$

де Q_c – необхідна компенсуюча потужність;

P – активна потужність навантаження;

φ_1 – початковий або природний кут зсув;

φ_2 – бажаний або заданий кут зсув.

Орієнтовна ефективність компенсації реактивної потужності

1. Зменшення втрат у мережі до 20–30%;
2. Підвищення напруги на 3–8% у точці споживання;
3. Підвищення ефективності роботи трансформаторів;
4. Зменшення навантаження на кабельні лінії;
5. Збільшення ресурсу обладнання;
6. Зменшення плати за реактивну енергію.

Недоліки та обмеження компенсації реактивної потужності.

Навіть за наявності переваг компенсація може створювати певні проблеми:

- ризик резонансу між мережевою індуктивністю та ємністю конденсаторної батареї;

- можливість перекомпенсації (напруга може збільшитися);
- збільшення рівня гармонік у присутності нелінійних споживачів;
- потреба в регулярній діагностиці конденсаторів.

Ефективна компенсація реактивної потужності це не лише встановлення окремих пристроїв, а комплексний процес:

1. Вимірювання та аналіз профілю споживання.
2. Виявлення джерел реактивної потужності.
3. Проведення моделювання режимів мережі.
4. Підбір обладнання (центрального, групового чи індивідуального).
5. Автоматизація регулювання.
6. Постійний моніторинг коефіцієнта потужності.

1.5 Висновки

1. Реактивна потужність виникає в електричних мережах через індуктивні та ємнісні властивості елементів, що потребують періодичного обміну енергією з джерелом для створення електромагнітних полів, а також через нелінійність та особливості режимів роботи сучасних електроприймачів.

2. Основними споживачами реактивної потужності є індуктивні навантаження – асинхронні двигуни, трансформатори, зварювальні агрегати, печі, ПРА та елементи мережі.

3. Зменшення споживання реактивної потужності досягається шляхом застосування технічних компенсуючих пристроїв (конденсаторів, синхронних компенсаторів, STATCOM, TSC/TCR), оптимізації роботи електродвигунів, модернізації мереж та впровадження заходів щодо зниження гармонік і балансування фаз.

4. Компенсація реактивної потужності є ключовим інструментом підвищення енергоефективності, оскільки дозволяє зменшити струмове навантаження мережі, підвищити коефіцієнт потужності, стабілізувати напругу та знизити втрати.

РОЗДІЛ 2

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ

2.1 Визначення рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів при проектуванні

Компенсуючі пристрої вибираються в комплексі з усіма компонентами системи електропостачання, з урахуванням зменшення величини струмів у мережі завдяки застосуванню засобів компенсації.

На верхньому рівні для електромережі енергосистеми визначається економічно доцільна величина реактивної потужності Q_e , яку можна передавати з енергосистеми на підприємство, а також загальна потужність компенсуючих пристроїв, які відповідають певному рівню компенсації реактивної потужності в мережі підприємства або споживача.

На нижчому рівні електромережі споживача, охоплюючи шини 0,4 кВ трансформаторних підстанцій, визначають раціональне розміщення компенсуючих пристроїв на шинах цехових трансформаторних підстанцій та розподільних пристроїв.

Визначення типу, потужності, місця встановлення та режиму експлуатації компенсуючих пристроїв має забезпечувати максимальну економічну ефективність при дотриманні нормованих значень напруги в живильних та розподільчих мережах, а також допустимих струмових навантажень у всіх елементах електромережі.

Загальна потужність (рівень компенсації) компенсуючих пристроїв, які повинні бути встановлені в системі електропостачання, розраховується наступним чином:

$$Q_{кп} = Q_p - Q_e \quad (2.1)$$

де Q_p – розрахункове реактивне навантаження;

Q_e – економічно доцільна реактивна потужність енергосистеми, яка відповідно до технічних умов може передаватися споживачу при максимальних активних навантаженнях.

Відповідно Q_e можна знайти з виразу:

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (2.2)$$

де P_p – розрахункове активне навантаження;

$\operatorname{tg}\varphi$ – заданий енергосистемою рівень споживання реактивної потужності ($\operatorname{tg}\varphi = 0,15$).

За наявності в електричній мережі споживачів синхронних двигунів та можливості їх використання в якості джерела реактивної потужності (є недовантаження активною потужністю) формулу (2.1) можна записати в наступному вигляді:

$$Q_{кп} = Q_p - Q_{сд} - Q_e, \quad (2.3)$$

де реактивна потужність $Q_{сд}$, що видається синхронним двигуном може бути обчислена за формулою:

$$Q_{сд} = P_{сд} \cdot \beta_{сд} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{ном}, \quad (2.4)$$

де $P_{сд}$ – номінальна або паспортна активна потужність СД;

$\beta_{сд}$ – коефіцієнт завантаження СД по активній потужності.

У випадку, якщо $\beta_{сд} < 1$, то можна розглянути варіант отримання додаткової реактивної потужності. Економічну доцільність використання синхронних двигунів в якості джерела реактивної потужності слід проводити окремим техніко-економічним розрахунком. Це пов'язано з тим, що вартість високовольтних батарей конденсаторів істотно знизилась, а вартість

електричної енергії збільшилась і не виключені випадки, завдяки великим втратам активної потужності на генерацію реактивної в таких машинах, коли економічно виправданим буде установка батареї конденсаторів замість використання генераторної можливості СД.

Методика вибору компенсуючих пристроїв та визначення рівня компенсації реактивної потужності в електричній мережі споживачів при проектуванні детально викладена в [3 і 4].

2.2 Оплата за споживання реактивної енергії

Рациональне використання електроенергії вимагає не лише контролю споживання активної складової, але й обмеження небажаного перетоку реактивної потужності в електричних мережах. Хоча реактивна енергія не виконує корисної роботи, вона створює додаткове навантаження на електропередавальні системи, збільшує струми в мережі та підвищує втрати потужності. Саме тому енергопостачальні компанії застосовують систему тарифікації за надмірне споживання реактивної енергії. Такий підхід стимулює споживачів до впровадження заходів із підвищення коефіцієнта потужності та оптимізації режимів роботи обладнання.

Запровадження плати за реактивну енергію має подвійний ефект:

- компенсує додаткові витрати енергосистеми;
- стимулює користувачів до зменшення реактивної складової та впровадження компенсуючих пристроїв.

Отже, тарифікація реактивної енергії є важливим економічним та технічним інструментом підвищення ефективності електроенергетичних систем.

В більшості країн, включно з Україною, встановлені нормативні межі коефіцієнта потужності. Як правило, споживачі повинні підтримувати певний рівень $\cos\phi$, зазвичай не нижче 0,9–0,95. Порушення цього нормативу означає збільшення кількості реактивної енергії, що проходить через мережу, і відповідно призводить до додаткових платежів.

Для контролю коефіцієнта потужності на підприємствах здійснюється:

- облік активної та реактивної енергії окремими лічильниками,
- розрахунок відхилення від нормативного значення коефіцієнту потужності,
- нарахування додаткової оплати у разі перевищення допустимих меж споживання.

Таким чином, регулювання коефіцієнта потужності є безпосередньою умовою уникнення додаткових фінансових витрат.

Розрахунок оплати або штрафів здійснюється на основі різниці між фактично спожитою реактивною енергією та її нормативним обсягом. Для цього енергопостачальні компанії встановлюють ліміти, які відповідають допустимому рівню споживання при заданому коефіцієнті потужності.

Основний принцип полягає у такому:

- системи електропостачання дозволяють певний обсяг реактивної енергії, який є природним для роботи споживача, оплата за який, пропорційна спожитій реактивній енергії (оплата P_1) [3, 4];
- якщо фактичний обсяг перевищує цей норматив, підприємство сплачує додаткову вартість за надлишок спожитої реактивної енергії, який нелінійно збільшується в залежності від обсягів її споживання (додаткова плата за недостатнє оснащення мережі засобами КРП P_2) [3, 4].

Формально обсяг реактивної енергії, який необхідно компенсувати або оплатити, пов'язаний зі співвідношенням між активною та реактивною складовими електроенергії. Чим нижчий коефіцієнт потужності, тим більше споживач платить.

Розрахунок плати за споживання і генерацію реактивної енергії використаний в даній магістерській роботі детально викладений в [3 і 4] і тут не наводиться.

2.3 Приведені витрати на компенсуючі пристрої

Приведені витрати – це економічний показник, який дозволяє оцінити доцільність інвестицій у компенсуюче обладнання з урахуванням капітальних витрат, експлуатаційних витрат і строку служби пристроїв. Вони застосовуються для вибору оптимального варіанта компенсації реактивної потужності серед можливих технічних рішень.

Складові приведених витрат:

1. Капітальні витрати (K):

- вартість конденсаторних батарей, синхронних компенсаторів і т.п.;
- витрати на монтаж та підключення;
- вартість додаткового обладнання (автоматика, захисти, вимикачі).

2. Експлуатаційні витрати (E):

- технічне обслуговування;
- заміна елементів, що мають обмежений ресурс (конденсатори, контактори);
- витрати електроенергії на роботу допоміжних систем (охолодження тощо).

3. Амортизаційні відрахування (A).

Загальні приведені річні витрати на компенсуючий пристрій визначають за формулою:

$$P_{\text{кп}} = K \cdot p + E, \quad (2.5)$$

де K – капітальні вкладення,

E – річні експлуатаційні витрати,

p – нормативний коефіцієнт приведення, що залежить від строку служби та нормативної ставки дисконту.

Зазвичай значення нормативного коефіцієнту p для електроенергетичних об'єктів приймається рівним 0,12, що відповідає поверненню капітальних витрат за 8 років. В той же час нормативний

коефіцієнт приведення при розрахунках може бути використаний інший, що відповідає іншому терміну повернення вкладень, наприклад, 4 роки.

2.4 Постановка задачі оптимізації

Зробимо постановку задачі оптимізації з пошуку оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживача.

Збільшення ступеня компенсації реактивної потужності в мережі споживача призводить до збільшення витрат, які описуються формулою (2.5) та інтерпретується кривою $\Pi_{\text{КП}}$ показаною на графіку рис. 2.2. В той же час збільшення ступеня компенсації призводить до зменшення плати за споживання та генерацію реактивної потужності підприємством, які інтерпретується кривою Π показаною на графіку рис. 2.2.

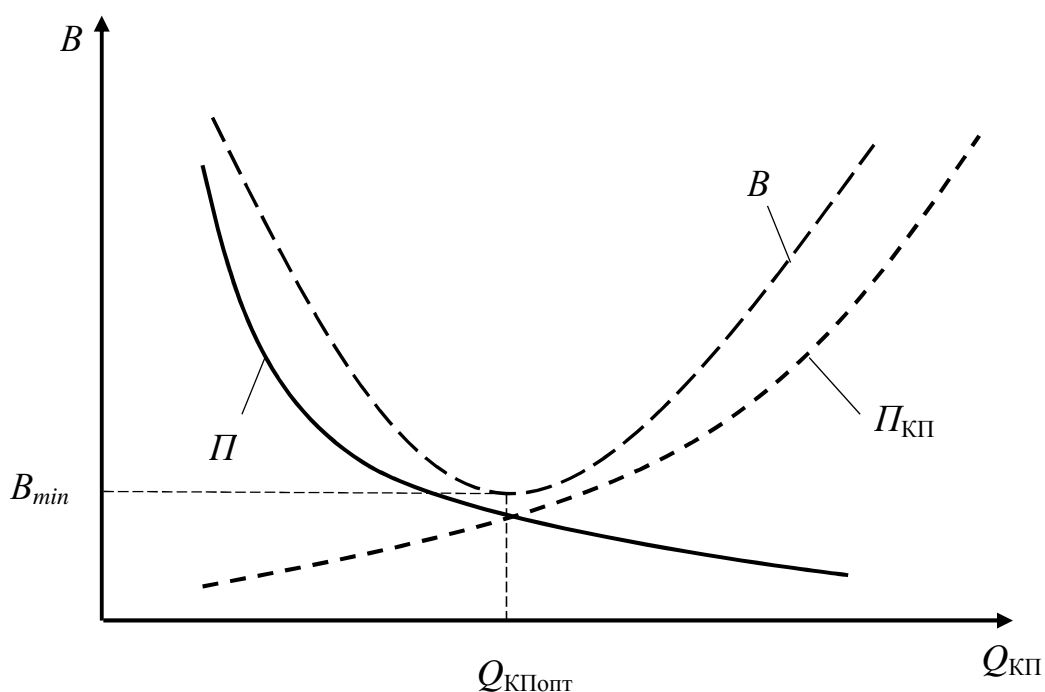


Рис. 2.2. Графічна інтерпретація постановки задачі визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів.

Тому, сума цих двох складових повинна мати мінімум B_{min} при певному значенні сумарної потужності компенсуючих пристроїв $Q_{\text{КПопт}}$, в

даному випадку батареї конденсаторів. Це значення і визначає оптимальний рівень компенсації реактивної потужності електричної мережі споживача.

Математично задача оптимізації може бути записана наступним виразом, тобто цільовою функцією:

$$B(Q_{\text{КП}}) = P_{\text{КП}}(Q_{\text{КП}}) + \Pi(Q_{\text{КП}}) \rightarrow \min, \quad (2.6)$$

Отже, задача оптимізації зводиться до пошуку такого значення $Q_{\text{КП}}$ при якому цільова функція (2.6) набуде мінімуму.

2.5 Висновки

1. Визначення рівня компенсації реактивної потужності здійснюється на основі багаторівневого підходу, де на верхньому рівні розраховується загальна потужність компенсувальних пристроїв. Він заснований на заданому значенні $\text{tg}\varphi$, за яким розраховується максимальна потужність, що може споживатися з електричної мережі енергопостачальної організації. Решта має бути скомпенсована. Дане значення потребує уточнення та наукового обґрунтування.

2. Плата за споживання реактивної енергії є основним економічним стимулом для споживачів до впровадження системи компенсації реактивної потужності.

3. Приведені річні витрати на КП є ключовим економічним показником, що дозволяє оцінити доцільність інвестицій.

4. Задача оптимізації рівня компенсації реактивної потужності зводиться до пошуку такого значення сумарної потужності компенсувальних пристроїв, при якому цільова функція (загальні річні витрати) набуде мінімального значення. Цільова функція є сумою приведених річних витрат на КП та річної плати за споживання і генерацію реактивної потужності.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ДЕЯКИХ ТИПОВИХ ГРАФІКІВ ПІДПРИЄМСТВ

3.1 Методика визначення оптимального рівня компенсації реактивної потужності

Оптимізація компенсації реактивної потужності є одним із важливих етапів проєктування систем електропостачання промислових підприємств, оскільки вона безпосередньо впливає на величину експлуатаційних витрат, втрати електроенергії та завантаження елементів мережі. Для визначення економічно доцільного рівня компенсації застосовується прямий аналітичний метод, який базується на порівнянні витрат на оплату реактивної енергії та вартості компенсувальних установок.

На першому етапі виконується розрахунок річної плати за споживання та генерацію реактивної енергії відповідно до заданого графіка електричного навантаження підприємства за відсутності компенсації. Після цього здійснюється серія розрахунків із поступовим збільшенням встановленої потужності конденсаторних установок, що дозволяє визначити витрати на реактивну енергію при різних рівнях її компенсації. На основі отриманих результатів будується залежність річних витрат на оплату реактивної енергії від величини потужності компенсуючих пристроїв.

На другому етапі формується графік приведених витрат на встановлення та експлуатацію компенсуючих пристроїв, в нашому випадку – конденсаторних установок різної потужності. Приведені витрати враховують, як капітальні вкладення, так і річні експлуатаційні витрати, що дозволяє об'єктивно оцінити економічну ефективність застосування компенсуючих пристроїв.

Наступним кроком є побудова сукупного графіка, який представляє собою суму витрат на оплату реактивної енергії та приведених витрат на

конденсаторні установки. Ця крива і є цільовою функцією дослідження, а її мінімум визначає оптимальний рівень компенсації реактивної потужності. У точці мінімуму забезпечується раціональне співвідношення між зниженням експлуатаційних витрат, витратами на обладнання та платою за споживання і генерацію реактивної енергії.

В даній роботі розрахунок проведено для умовної двохтрансформаторної підстанції з розрахунковим активним навантаженням 1000 кВт. Передбачається встановлення двох конденсаторних установок, підключених до обох секцій шин розподільчого пристрою ТП. Такий підхід дозволяє визначити оптимальне значення $\text{tg}\phi$, яке в подальшому може бути масштабоване для підприємств з іншими значеннями розрахункового навантаження та різною кількістю ТП.

Для розрахунків приймемо:

– Вартість конденсаторних установок типу УКРМ для різної комплектації отримані з Internet магазину [7] та використані в даній роботі наведені в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Вартості конденсаторних установок типу УКРМ за даними [7].

Тип конденсаторної установки	Потужність, квар	Вартість, грн.. при комплектації	
		ЕТІ+Novar	ЕТІ+ТМ Електро
УКРМ 0,4-25/3-5	25,0	38318	22295
УКРМ 0,4-35/4-5	35,0	41160	26215
УКРМ 0,4-50/10-4	50,0	51058	33957
УКРМ 0,4-70/5-10	70,0	50960	41258
УКРМ 0,4-100/4-10	100,0	65268	48314
УКРМ 0,4 160/6-20	160,0	93933	85260
УКРМ 0,4 200/6-20	200,0	107604	88200
УКРМ 0,4-300/7-25	300,0	143080	108143
УКРМ 0,4-400/10-40	400,0	193648	154595

– Кількість зимових робочих днів 147 на рік, зимових вихідних – 65 днів, літніх робочих 105 та літніх вихідних – 48 днів. В разі, якщо підприємство працює без вихідних вихідні дні додавались до робочих.

– Літній графік навантаження на 15% менший за зимовий.

– Вартість активної електроенергії за розрахунковий період $C = 10,32$ грн./кВт·год, економічний еквівалент реактивної потужності $D = 0,03$ кВт/квар.

– Генерація реактивної енергії в мережу енергосистеми відсутня, відповідно і $P_r = 0$.

Отримані результати можуть бути використані, як методична основа для проєктування систем компенсації реактивної потужності в енергетичних мережах промислових споживачів.

3.2 Приведені річні витрати на компенсуючі пристрої

Скориставшись даними табл. 3.1 визначимо приведені річні витрати на компенсуючі пристрої за формулою (2.5). При цьому річні експлуатаційні витрати E будемо визначати за формулою:

$$E = K \cdot (p_a + p_e), \quad (3.1)$$

де p_a – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань ($p_a = 15\%$),

p_e – нормативний коефіцієнт експлуатаційних відрахувань ($p_e = 5\%$).

Підставивши (3.1) в (2.5) та зробивши спрощення остаточно отримаємо формулу для розрахунку приведених витрат в компенсуючі пристрої (нашому випадку – конденсаторні установки):

$$P_{\text{КП}} = K \cdot (p + p_a + p_e). \quad (3.2)$$

В якості прикладу, розрахуємо приведені річні витрати при підключенні конденсаторної установки потужністю 25 квар в комплектації ЕТІ+Novar на кожен секцію шин ТП:

$$P_{\text{КП}} = K \cdot (p + p_a + p_e) = 2 \cdot 38318(0,12 + 0,15 + 0,05) = 24523,52 \text{ грн.}$$

Розрахунок річних приведених витрат для інших потужностей конденсаторних установок та іншої комплектації є подібним, а результати розрахунку наведені в табл. 3.2.

Табл. 3.2. Результати розрахунку приведених річних витрат на конденсаторні установки.

Загальна потужність на дві секції, квар	Приведені річні витрати, грн.. при комплектації	
	ETI+Novar	ETI+TM Електро
50	24523,52	14268,80
70	26342,40	16777,60
100	32677,12	21732,48
140	32614,40	26405,12
200	41771,52	30920,96
320	60117,12	54566,40
400	68866,56	56448,00
600	91571,20	69211,52
800	123934,72	98940,80
850	148458,24	113209,60
870	150277,12	115718,40

За даними табл. 3.2 побудовані графіки залежності річних приведених витрат на конденсаторні установки в функції їх потужності, які показані на рис. 3.1.

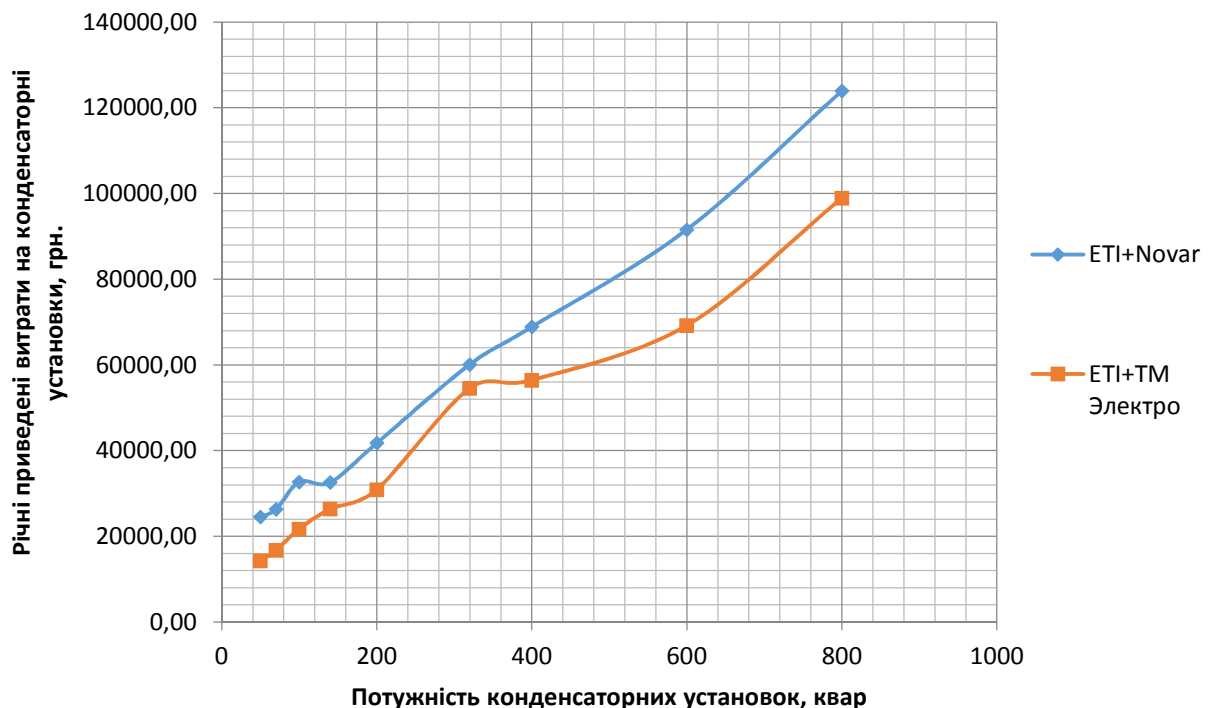


Рис. 3.1. Графік залежності річних приведених витрат на конденсаторні установки в залежності від їх потужності.

3.3 Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії

Типові графіки споживання активної і реактивної потужності для даного підприємства взято з [6]. В табл. 3.3 проведений розрахунок сходинок графіка для активної і реактивної потужності робочого дня зими, а в табл. 3.4 – вихідного.

Табл. 3.3. Результати розрахунку сходинок графіків навантаження підприємства чорної металургії для робочого дня зими.

Години	P , %	Q , %	P , кВт	Q , квар
1	85	90	850	792
2	85	90	850	792
3	85	90	850	792
4	90	95	900	836
5	90	95	900	836
6	95	98	950	862
7	95	98	950	862
8	95	98	950	862
9	100	100	1000	880
10	100	100	1000	880
11	100	100	1000	880
12	95	95	950	836
13	95	95	950	836
14	90	95	900	836
15	90	95	900	836
16	98	98	980	862
17	98	98	980	862
18	98	98	980	862
19	95	96	950	845
20	95	96	950	845
21	90	95	900	836
22	90	95	900	836
23	85	90	850	792
24	85	90	850	792

Табл. 3.4. Результати розрахунку сходинок графіків навантаження підприємства чорної металургії для вихідного дня зими.

Години	P , %	Q , %	P , кВт	Q , квар
1	45	68	450	598
2	45	68	450	598
3	45	68	450	598
4	45	68	450	598
5	45	68	450	598
6	45	68	450	598
7	45	68	450	598
8	45	68	450	598
9	40	65	400	572
10	40	65	400	572
11	40	65	400	572
12	40	65	400	572
13	40	65	400	572
14	40	65	400	572
15	40	65	400	572
16	40	65	400	572
17	40	65	400	572
18	40	65	400	572
19	45	68	450	598
20	45	68	450	598
21	45	68	450	598
22	45	68	450	598
23	45	68	450	598
24	45	68	450	598

Аналіз коефіцієнту потужності електрообладнання, що застосовується на підприємствах чорної металургії табл. 30-2 [6] показав, що в середньому він складає біля 0,75. Цьому значенню відповідає $\text{tg}\varphi = 0,88$. Отже, розрахункова реактивна потужність тоді складе

$$Q = P \cdot \text{tg}\varphi = 1000 \cdot 0,88 = 880 \text{ квар.}$$

Ця розрахована реактивна потужність і буде використовуватись, як максимальна (100%) при побудові графіка реактивної потужності зимової робочої доби та використана при розрахунках в табл. 3.3. і 3.4.

Розрахунок споживання реактивної і активної електроенергії по різних добам, а також режиму роботи конденсаторних установок проведемо з використанням програми *Microsoft Excel*. В табл. 3.5 наведені вихідні дані, а також проведені попередні розрахунки. В табл. 3.6 проведений розрахунок режимів роботи компенсуючих пристроїв, а також реактивної енергії спожитої з енергосистеми. Проведені в табл. 3.6 розрахунки проілюстровані графіками наведеними на рис. 3.2-3.5.

Розрахуємо річне споживання активної і реактивної електроенергії:

– активної

$$\begin{aligned} WP_p &= \sum WP_{\text{доби}} \cdot d = 22240 \cdot 147 + 10300 \cdot 65 + 18904 \cdot 105 + 8755 \cdot 48 = \\ &= 6343940 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}, \end{aligned}$$

– реактивної

$$\begin{aligned} WQ_p &= \sum WQ_{\text{доби}} \cdot d = 18952 \cdot 147 + 12898 \cdot 65 + 15929 \cdot 105 + 10783 \cdot 48 = \\ &= 5814436 \text{ квар} \cdot \text{год} / \text{рік}. \end{aligned}$$

Визначимо основну плату за перетікання реактивної електроенергії згідно з [8]:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \Pi_c + \Pi_r = WQ_p \cdot D \cdot \Pi = \\ &= 5814436 \cdot 0,03 \cdot 10,32 = 1800149 \text{ грн.} / \text{рік}. \end{aligned}$$

Визначимо надбавку за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності [8]:

Табл. 3.5. Вихідні дані для розрахунку режимів роботи компенсуючих пристроїв та добового споживання активної і реактивної електроенергії підприємства чорної металургії.

Розрахункова активна потужність по заводу	$P_p = 1\ 000$	кВт											
Розрахункова реактивна потужність по заводу без КП	$Q_p = 880$	квар											
Сумарна потужність КП на стороні 0,4 кВ	$Q_{кн} = 50$	квар											
Сумарна потужність КП на стороні 10 кВ	$Q_{кв} = 0$	квар											
Потужність КП встановлених на АД	$Q_{кп.дв.} = 0$	квар											
Потужність КП встановлених пічах	$Q_{кп.піч.} = 0$	квар											
Максимальна реактивна потужність, що генерується СД	$Q_{max.сд} = 0$	квар											

	%		Зима		Літо		%		Зима		Літо	
	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний
	$P_p, \%$	$P_v, \%$	$P_{зр}$	$P_{зв}$	$P_{лр}$	$P_{лв}$	$Q_p, \%$	$Q_v, \%$	$Q_{зр}$	$Q_{зв}$	$Q_{лр}$	$Q_{лв}$
1	85	45	850	450	723	383	90	68	792	598	673	509
2	85	45	850	450	723	383	90	68	792	598	673	509
3	85	45	850	450	723	383	90	68	792	598	673	509
4	90	45	900	450	765	383	95	68	836	598	711	509
5	90	45	900	450	765	383	95	68	836	598	711	509
6	95	45	950	450	808	383	98	68	862	598	733	509
7	95	45	950	450	808	383	98	68	862	598	733	509
8	95	45	950	450	808	383	98	68	862	598	733	509
9	100	40	1000	400	850	340	100	65	880	572	748	486
10	100	40	1000	400	850	340	100	65	880	572	748	486
11	100	40	1000	400	850	340	100	65	880	572	748	486
12	95	40	950	400	808	340	95	65	836	572	711	486
13	95	40	950	400	808	340	95	65	836	572	711	486
14	90	40	900	400	765	340	95	65	836	572	711	486
15	90	40	900	400	765	340	95	65	836	572	711	486
16	98	40	980	400	833	340	98	65	862	572	733	486
17	98	40	980	400	833	340	98	65	862	572	733	486
18	98	40	980	400	833	340	98	65	862	572	733	486
19	95	45	950	450	808	383	96	68	845	598	718	509
20	95	45	950	450	808	383	96	68	845	598	718	509
21	90	45	900	450	765	383	95	68	836	598	711	509
22	90	45	900	450	765	383	95	68	836	598	711	509
23	85	45	850	450	723	383	90	68	792	598	673	509
24	85	45	850	450	723	383	90	68	792	598	673	509
Енергія за добу			22 240	10 300	18 904	8 755			20 152	14 098	17 129	11 983

Табл. 3.6. Розрахунок режимів роботи компенсуючих пристроїв та добового споживання реактивної електроенергії підприємства чорної металургії.

	З и м а															
	р о б о ч а д о б а								в и х і д н а д о б а							
	Qкн	Qкв вимкнен	Qкп.дв вимкнен	Qкп.піч. вимкнен	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ	Qкн	Qкв вимкнен	Qкп.дв вимкнен	Qкп.піч. вимкнен	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ
1	50	0	0	0	0	50	742	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
2	50	0	0	0	0	50	742	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
3	50	0	0	0	0	50	742	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
4	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
5	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
6	50	0	0	0	0	50	812	0,855	50	0	0	0	0	50	548	0,916
7	50	0	0	0	0	50	812	0,855	50	0	0	0	0	50	548	0,916
8	50	0	0	0	0	50	812	0,855	50	0	0	0	0	50	548	0,916
9	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	522	0,913
10	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	522	0,913
11	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	522	0,913
12	50	0	0	0	0	50	786	0,827	50	0	0	0	0	50	522	0,913
13	50	0	0	0	0	50	786	0,827	50	0	0	0	0	50	522	0,913
14	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	522	0,913
15	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	522	0,913
16	50	0	0	0	0	50	812	0,829	50	0	0	0	0	50	522	0,913
17	50	0	0	0	0	50	812	0,829	50	0	0	0	0	50	522	0,913
18	50	0	0	0	0	50	812	0,829	50	0	0	0	0	50	522	0,913
19	50	0	0	0	0	50	795	0,837	50	0	0	0	0	50	548	0,916
20	50	0	0	0	0	50	795	0,837	50	0	0	0	0	50	548	0,916
21	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
22	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
23	50	0	0	0	0	50	742	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
24	50	0	0	0	0	50	742	0,873	50	0	0	0	0	50	548	0,916
							18 952	0,8522							12 898	1,2522

Продовження табл. 3.6.

Л і т о															
р о б о ч а д о б а								в и х і д н а д о б а							
Qкн	Qкв	Qкп.дв	Qкп.піч.	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ	Qкн	Qкв	Qкп.дв	Qкп.піч.	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ
	увімкне	вимкне	вимкне						вимкне	вимкне	вимкне				
50	0	0	0	0	50	623	0,863	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	623	0,863	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	623	0,863	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	683	0,846	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	683	0,846	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	683	0,846	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	661	0,818	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	661	0,818	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	683	0,820	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	683	0,820	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	683	0,820	50	0	0	0	0	50	436	1,283
50	0	0	0	0	50	668	0,827	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	668	0,827	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	623	0,863	50	0	0	0	0	50	459	1,199
50	0	0	0	0	50	623	0,863	50	0	0	0	0	50	459	1,199
						15 929	0,8426							10 783	1,2316

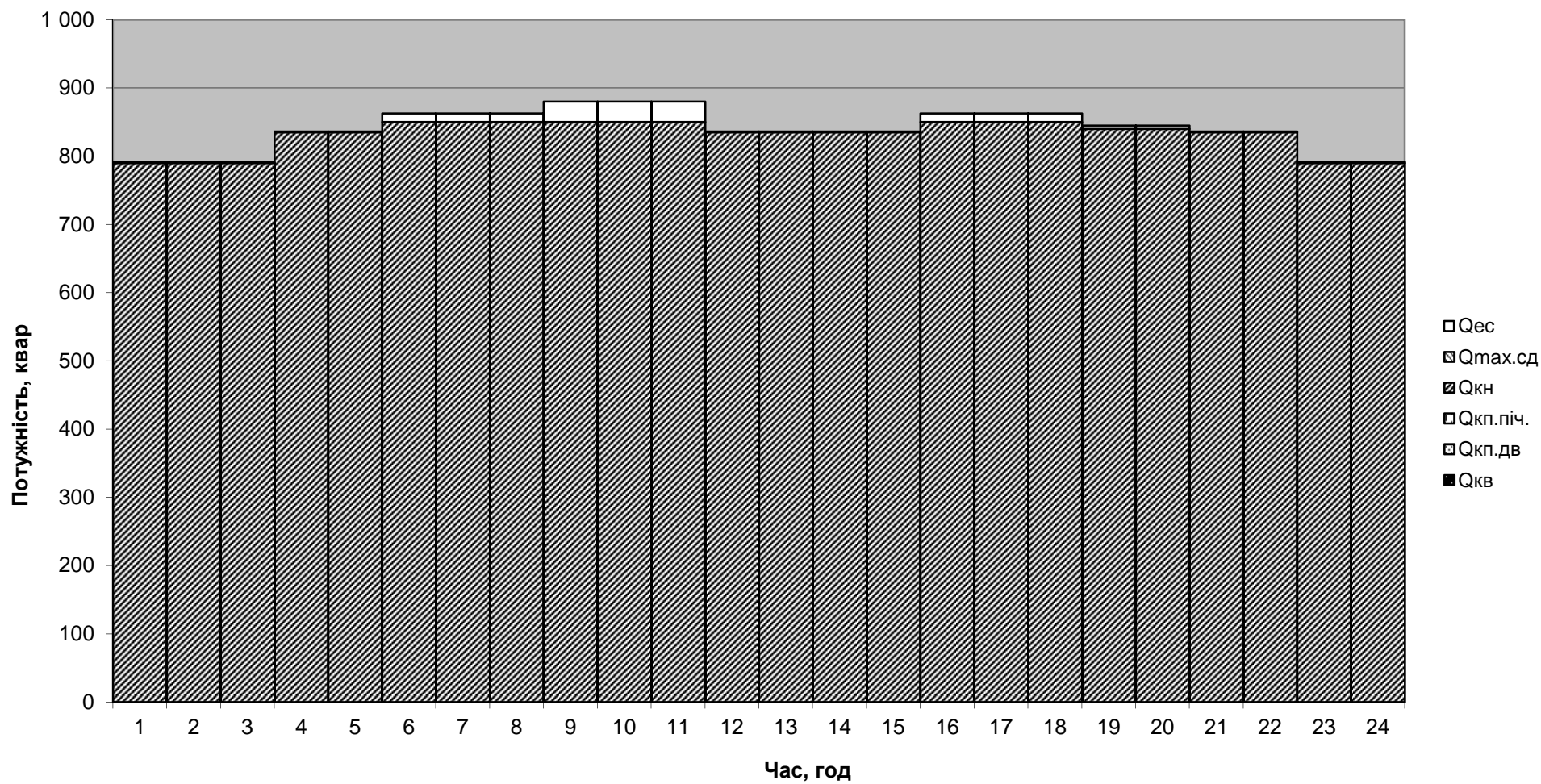


Рис. 3.2. Графік споживання і генерації реактивної потужності за зимову робочу добу для підприємства чорної металургії ($Q_{кп} = 850$ квар).

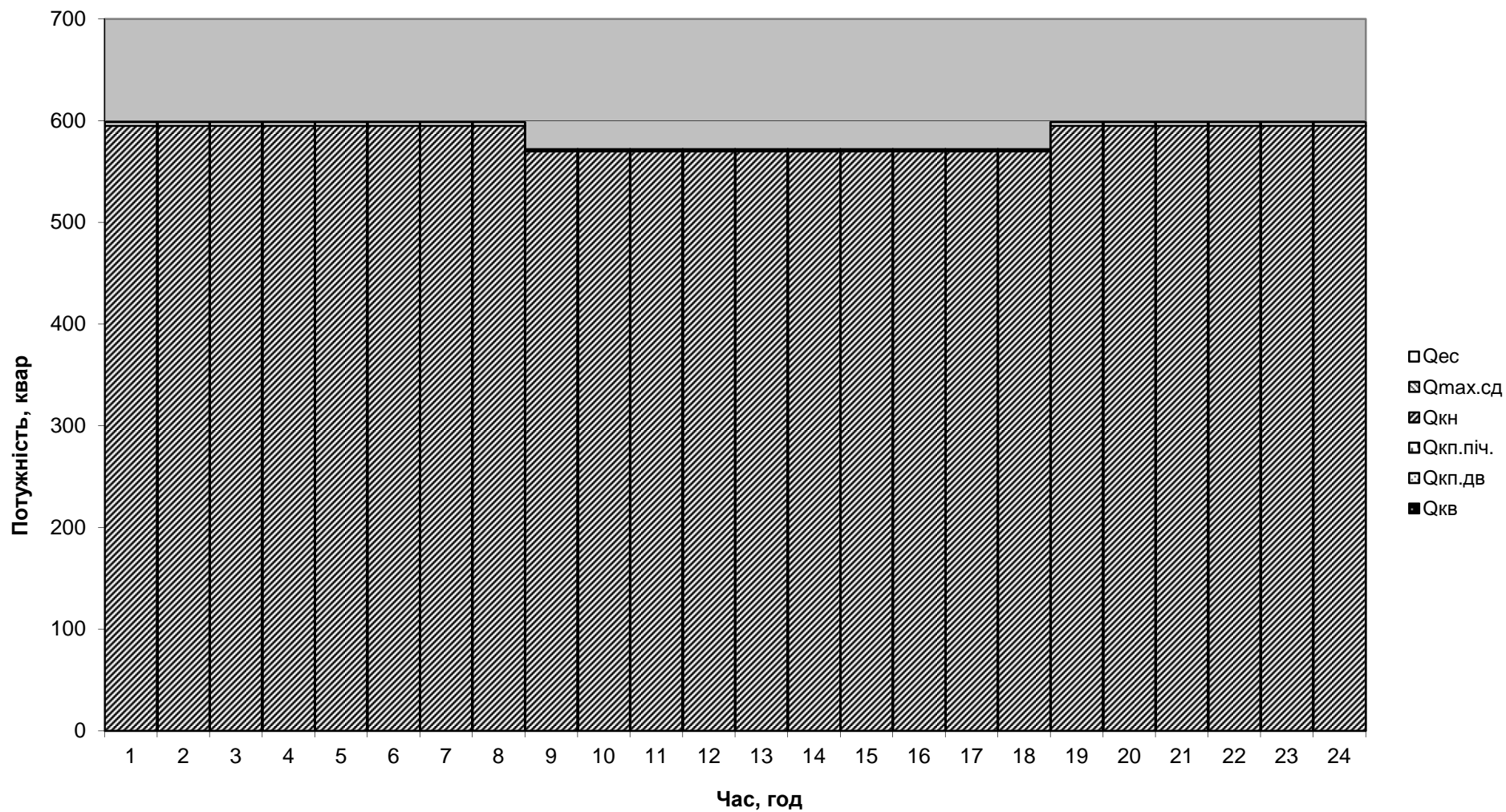


Рис. 3.3. Графік споживання і генерації реактивної потужності за зимову вихідну добу для підприємства чорної металургії ($Q_{кл} = 850$ квар).

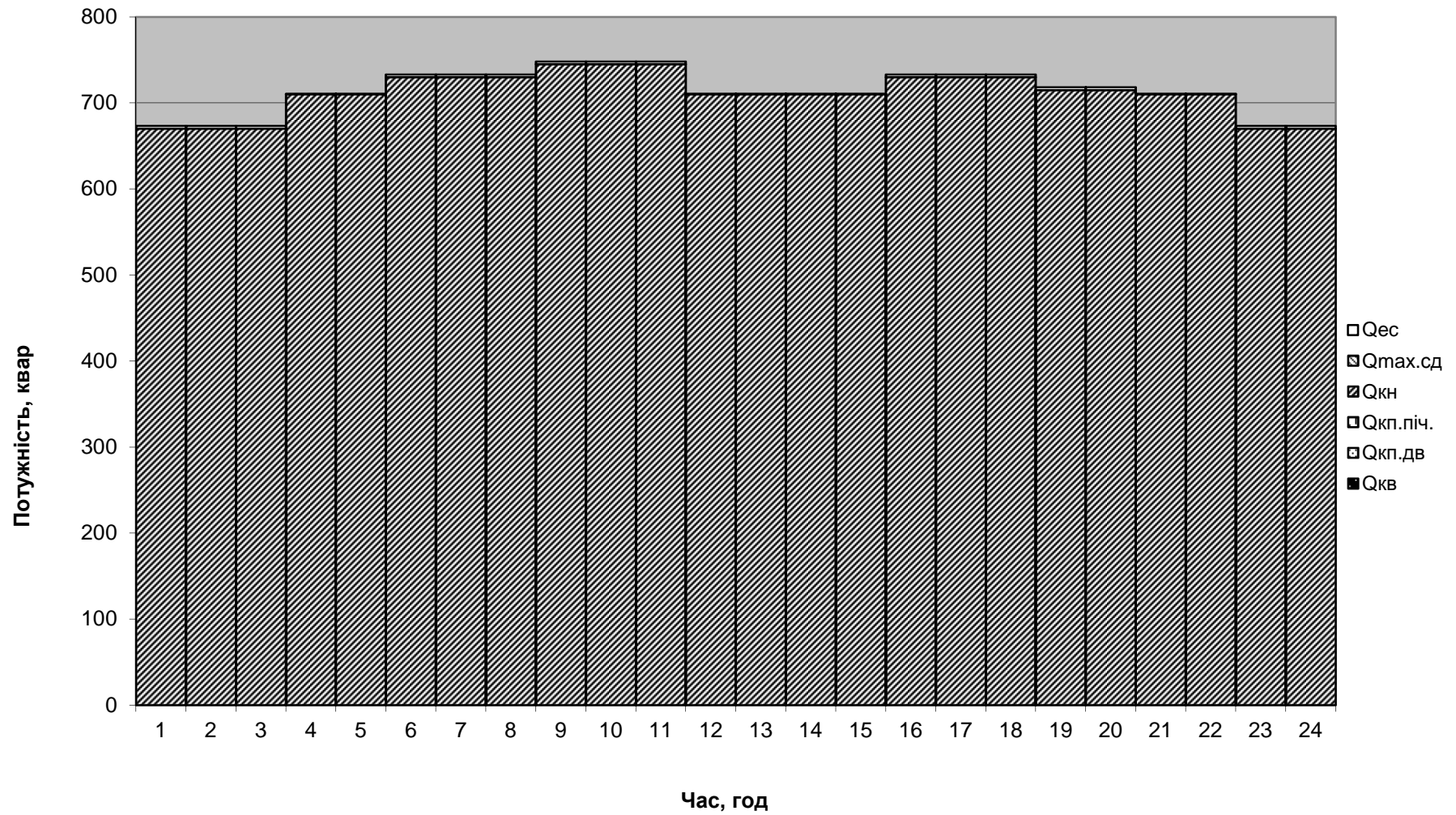


Рис. 3.4. Графік споживання і генерації реактивної потужності за літню робочу добу для підприємства чорної металургії ($Q_{кп} = 850$ квар).

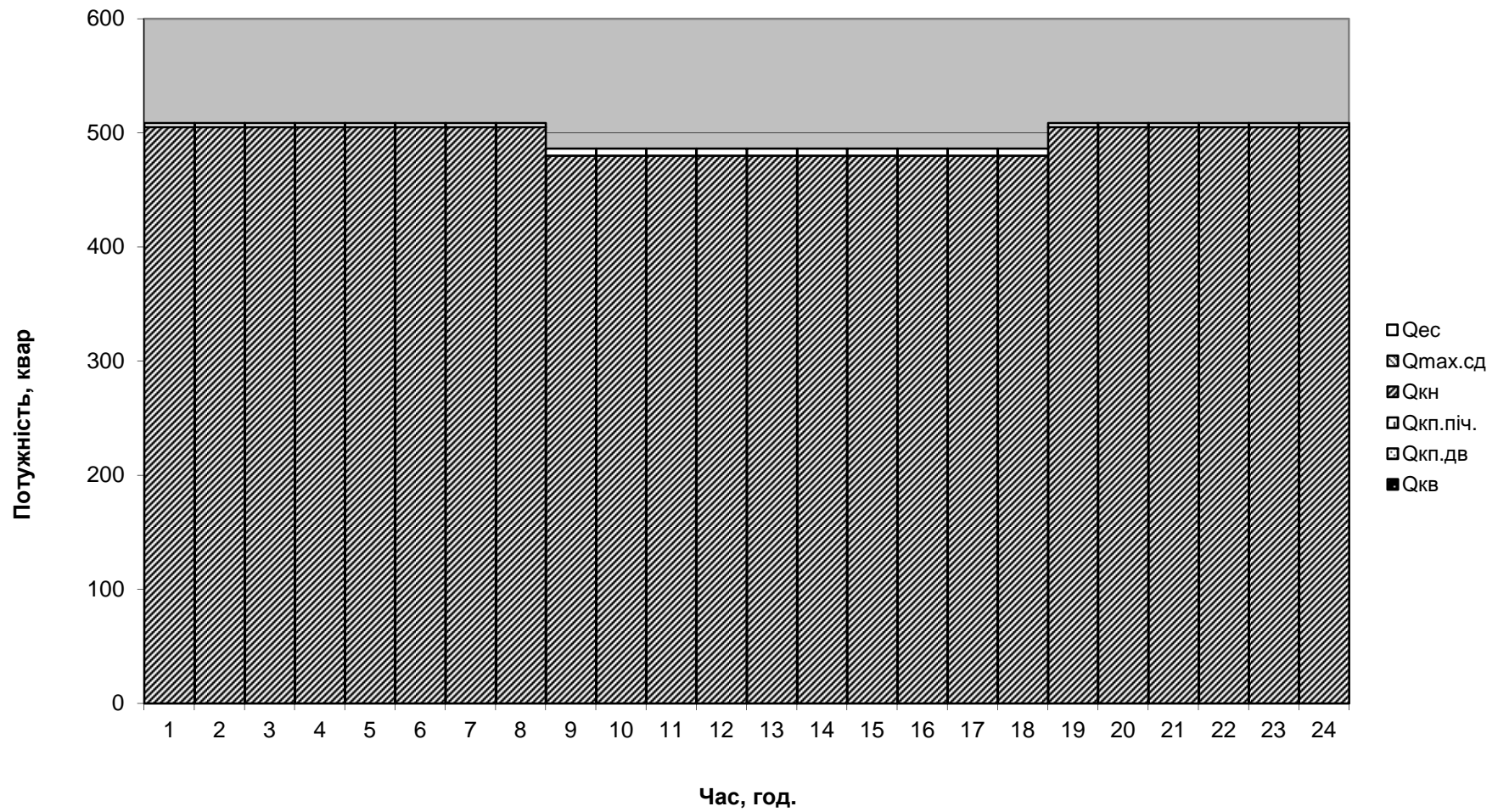


Рис. 3.5. Графік споживання і генерації реактивної потужності за літню вихідну добу для підприємства чорної металургії ($Q_{кп} = 850$ квар).

$$P_2 = P_c \cdot (\operatorname{tg}\varphi - 0,25)^2 = 1800149(0,917 - 0,25)^2 = 799748 \text{ грн.},$$

де P_c – плата за споживання реактивної електроенергії.

Фактичний коефіцієнт потужності споживача в середньому за розрахунковий період визначимо за формулою:

$$\operatorname{tg}\varphi = WQ_p / WP_p = 5814436 / 6343940 = 0,917.$$

де WQ_p – споживання реактивної електроенергії за розрахунковий період, квар·год;

WP_p – споживання активної електроенергії за той же період, кВт·год.

Плата за перетікання реактивної енергії на рік при даному рівні компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії складе:

$$P = P_1 + P_2 = 1800149 + 799748 = 2599897 \text{ грн.}$$

Розрахунок річної плати за перетікання реактивної енергії при інших рівнях компенсації реактивної потужності (інших потужностях батарей конденсаторів) є подібним і в даній роботі не наводиться. А результати цього розрахунку наведені в підсумковій таблиці – табл. 3.7.

Розрахуємо цільову функцію (2.6) скориставшись результатами обчислень з табл. 3.2 і 3.7. Так при $Q_{ку} = 50$ квар і комплектації ЕТІ+Novar сумарні витрати складуть:

$$B(50) = P_{кп}(50) + P(50) = 24523,52 + 2599897 = 2624420,52 \text{ грн.}$$

Розрахунок значень цільової функції при інших потужностях батарей конденсаторів та іншій комплектації є подібним. Результати цього розрахунку наведені в табл. 3.8.

Табл. 3.7. Результати розрахунку річної плати за перетікання реактивної енергії при різних рівнях компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії.

Q_{KV} , квар	WQ_p , квар·год	tgφ	P_1 , грн.	P_2 , грн.	P , грн.
50	5814436	0,917	1800149	799748	2599897
70	5639236	0,889	1745907	712705	2458613
100	5376436	0,847	1664545	594236	2258781
140	5026036	0,792	1556061	457550	2013610
200	4500436	0,709	1393335	294070	1687405
320	3449236	0,544	1067883	92119	1160002
400	2748436	0,433	850916	28570	879486
600	1178886	0,186	364983	0	364983
800	302476	0,048	93647	0	93647
850	43731	0,007	13539	0	13539

Табл. 3.8. Результати розрахунку цільової функції при різних рівнях компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії.

Q_{KV} , квар	B , грн.		tgφ в режимі max навантаження
	ETI+Novar	ETI+TM Електро	
50	2624420,52	2614165,8	0,83
70	2484955,4	2475390,6	0,81
100	2291458,12	2280513,48	0,78
140	2046224,4	2040015,12	0,74
200	1729176,52	1718325,96	0,68
320	1220119,12	1214568,4	0,56
400	948352,56	935934	0,48
600	456554,2	434194,52	0,28
800	217581,72	192587,8	0,08
850	161997,24	126748,6	0,03

Також цікавим для аналітики, було розрахувати значення tgφ в режимі max навантаження. Так, як правило, розрахунок компенсації реактивної потужності проводиться саме для такого режиму по заданому значенню tgφ. При $Q_{KV} = 50$ квар його значення складе

$$\text{tg}\varphi_{\max} = (Q_p - Q_{KV})/P_p = (880 - 50)/1000 = 0,83.$$

Розрахунок $\text{tg}\varphi$ в режимі max навантаження для інших значень потужностей батарей конденсаторів є подібним, результати розрахунку зведені в табл. 3.8.

За даними табл. 3.8 побудовані графіки залежності цільової функції від рівня компенсації реактивної потужності рис. 3.6 та $\text{tg}\varphi$ в режимі max навантаження рис. 3.7.

Проаналізувавши графіки наведені на рис. 3.6 і 3.7 можна зробити наступні висновки. Для графіку навантаження підприємства чорної металургією є доцільним глибока, майже повна компенсація реактивної потужності. Це пояснюється рядом причин, насамперед достатньо рівним без суттєвих змін графіком навантаження активної та реактивної потужності, що призводить до повного використання потужності батарей конденсаторів практично не змінюючи її навантаження протягом робочих та вихідних днів, а також значною вартістю електричної енергії та значною дешевизною використаних батарей конденсаторів.

3.4 Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для підприємства верстатобудівної промисловості

Типові графіки споживання активної і реактивної потужності для даного підприємства взято з [6]. В табл. 3.9 проведений розрахунок сходинок графіка для активної і реактивної потужності робочого дня зими, а в табл. 3.10 – вихідного.

Вибір верстатобудівної промисловості для аналізу оптимального рівня компенсації реактивної потужності є цікавим з точки зору того, що графік споживання активної та реактивної потужності має суттєві коливання та зміни протягом робочої доби. Так, на графіку відслідковується два піка енергоспоживання, які відповідають першій та другій зміні в роботі даного підприємства.

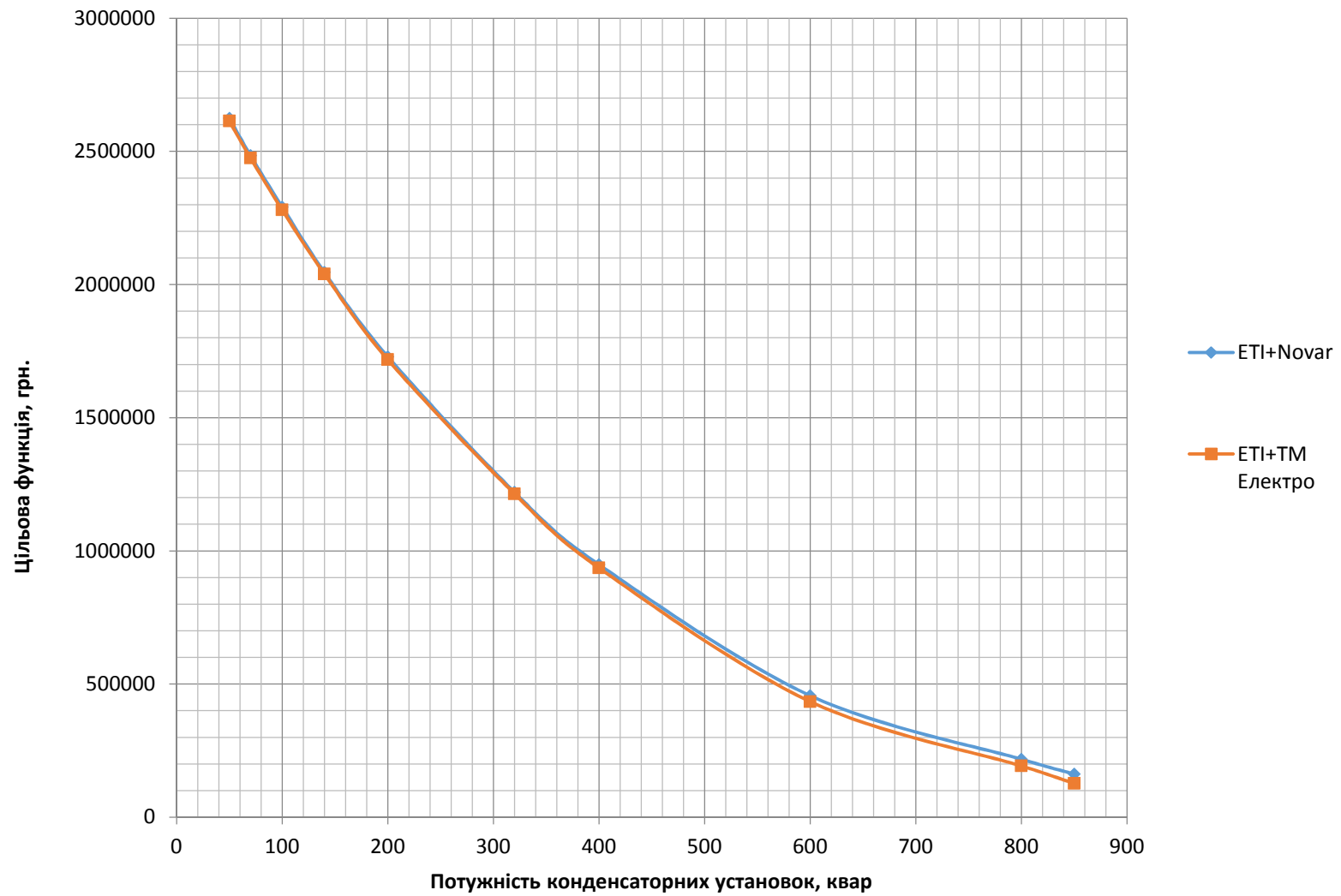


Рис. 3.6. Графік залежності цільової функції від рівня компенсації реактивної потужності (потужності батарей конденсаторів) для підприємства чорної металургії.

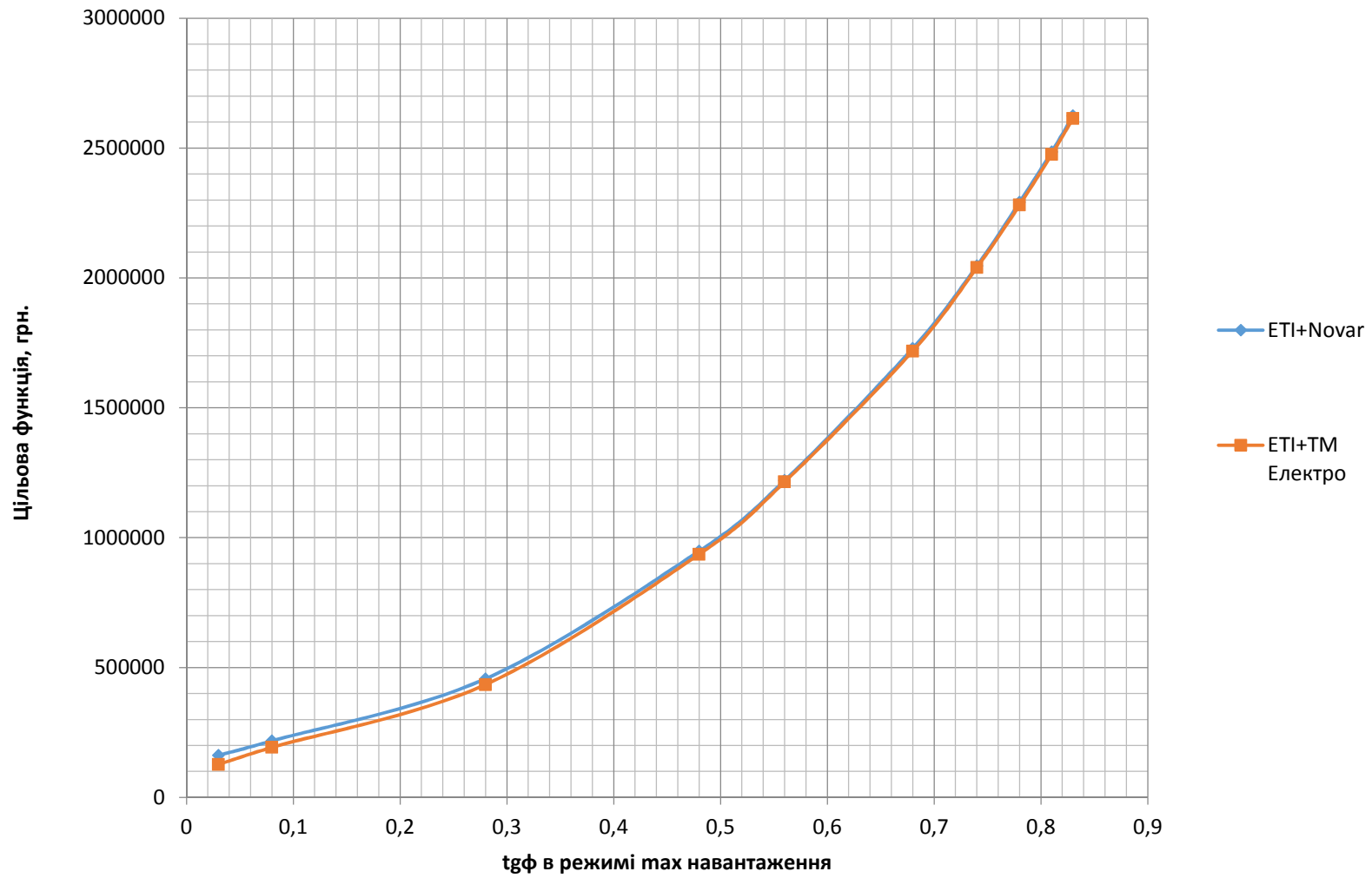


Рис. 3.7. Графік залежності цільової функції від tgφ в режимі max навантаження для підприємства чорної металургії.

Табл. 3.9. Результати розрахунку сходинок графіків навантаження
верстатобудівного підприємства для робочого дня зими.

Години	$P, \%$	$Q, \%$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{квар}$
1	45	63	450	554
2	45	63	450	554
3	45	63	450	554
4	45	63	450	554
5	50	65	500	572
6	50	65	500	572
7	80	85	800	748
8	90	95	900	836
9	100	100	1000	880
10	100	100	1000	880
11	90	95	900	836
12	80	85	800	748
13	90	90	900	792
14	90	95	900	836
15	100	100	1000	880
16	100	100	1000	880
17	90	90	900	792
18	80	85	800	748
19	60	70	600	616
20	60	70	600	616
21	50	65	500	572
22	50	65	500	572
23	50	65	500	572
24	45	63	450	554

Табл. 3.10. Результати розрахунку сходинок графіків навантаження
верстатобудівного підприємства для вихідного дня зими.

Години	$P, \%$	$Q, \%$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{квар}$
1	2	3	4	5
1	38	60	380	528
2	38	60	380	528
3	38	60	380	528
4	38	60	380	528
5	38	60	380	528

Продовження табл. 3.10.

1	2	3	4	5
6	38	60	380	528
7	38	60	380	528
8	38	60	380	528
9	25	52	250	458
10	25	52	250	458
11	25	52	250	458
12	25	52	250	458
13	25	52	250	458
14	25	52	250	458
15	25	52	250	458
16	25	52	250	458
17	25	52	250	458
18	38	60	380	528
19	38	60	380	528
20	38	60	380	528
21	38	60	380	528
22	38	60	380	528
23	38	60	380	528
24	38	60	380	528

Аналіз коефіцієнту потужності електрообладнання, що застосовується на підприємствах верстатобудівної промисловості табл. 30-2 [6] показав, що в середньому він складає біля 0,75. Цьому значенню відповідає $\text{tg}\varphi = 0,88$. Отже, розрахункова реактивна потужність тоді складе

$$Q = P \cdot \text{tg}\varphi = 1000 \cdot 0,88 = 880 \text{ квар.}$$

Ця розрахована реактивна потужність і буде використовуватись, як максимальна (100%) при побудові графіка реактивної потужності зимової робочої доби та використана при розрахунках в табл. 3.9. і 3.10.

Розрахунок споживання реактивної і активної електроенергії по різних добам, а також режиму роботи конденсаторних установок проведемо з використанням програми *Microsoft Excel*. В табл. 3.11 наведені вихідні дані, а

також проведені попередні розрахунки. В табл. 3.12 проведений розрахунок режимів роботи компенсуючих пристроїв, а також реактивної енергії спожитої з енергосистеми. Проведені в табл. 3.12 розрахунки проілюстровані графіками наведеними на рис. 3.8-3.11.

Розрахуємо річне споживання активної і реактивної електроенергії:

– активної

$$\begin{aligned} WP_p &= \Sigma WP_{\text{добі}} \cdot d = 16850 \cdot 147 + 7950 \cdot 65 + 14323 \cdot 105 + 6758 \cdot 48 = \\ &= 4821922,5 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}, \end{aligned}$$

– реактивної

$$\begin{aligned} WQ_p &= \Sigma WQ_{\text{добі}} \cdot d = 15520 \cdot 147 + 10838 \cdot 65 + 13012 \cdot 105 + 9033 \cdot 48 = \\ &= 4785763 \text{ квар} \cdot \text{год/рік}. \end{aligned}$$

Визначимо основну плату за перетікання реактивної електроенергії згідно з [8]:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_c + P_r = WQ_p \cdot D \cdot \zeta = \\ &= 4785763 \cdot 0,03 \cdot 10,32 = 1481672 \text{ грн./рік}. \end{aligned}$$

Визначимо надбавку за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності [8]:

$$P_2 = P_c \cdot (\text{tg}\varphi - 0,25)^2 = 1481672(0,993 - 0,25)^2 = 816857 \text{ грн.},$$

де P_c – плата за споживання реактивної електроенергії.

Фактичний коефіцієнт потужності споживача в середньому за розрахунковий період визначимо за формулою:

Табл. 3.11. Вихідні дані для розрахунку режимів роботи компенсуючих пристроїв та добового споживання активної і реактивної електроенергії верстатобудівного підприємства.

Розрахункова активна потужність по заводу	$P_p = 1\ 000$	кВт										
Розрахункова реактивна потужність по заводу без КП	$Q_p = 880$	квар										
Сумарна потужність КП на стороні 0,4 кВ	$Q_{кн} = 50$	квар										
Сумарна потужність КП на стороні 10 кВ	$Q_{кв} = 0$	квар										
Потужність КП встановлених на АД	$Q_{кп.дв.} = 0$	квар										
Потужність КП встановлених пічах	$Q_{кп.піч.} = 0$	квар										
Максимальна реактивна потужність, що генерується СД	$Q_{max.сд} = 0$	квар										

	%		Зима		Літо		%		Зима		Літо	
	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний	робочий	вихідний
	$P_p, \%$	$P_v, \%$	$P_{зр}$	$P_{зв}$	$P_{лр}$	$P_{лв}$	$Q_p, \%$	$Q_v, \%$	$Q_{зр}$	$Q_{зв}$	$Q_{лр}$	$Q_{лв}$
1	45	38	450	380	383	323	63	60	554	528	471	449
2	45	38	450	380	383	323	63	60	554	528	471	449
3	45	38	450	380	383	323	63	60	554	528	471	449
4	45	38	450	380	383	323	63	60	554	528	471	449
5	50	38	500	380	425	323	65	60	572	528	486	449
6	50	38	500	380	425	323	65	60	572	528	486	449
7	80	38	800	380	680	323	85	60	748	528	636	449
8	90	38	900	380	765	323	95	60	836	528	711	449
9	100	25	1000	250	850	213	100	52	880	458	748	389
10	100	25	1000	250	850	213	100	52	880	458	748	389
11	90	25	900	250	765	213	95	52	836	458	711	389
12	80	25	800	250	680	213	85	52	748	458	636	389
13	90	25	900	250	765	213	90	52	792	458	673	389
14	90	25	900	250	765	213	95	52	836	458	711	389
15	100	25	1000	250	850	213	100	52	880	458	748	389
16	100	25	1000	250	850	213	100	52	880	458	748	389
17	90	25	900	250	765	213	90	52	792	458	673	389
18	80	38	800	380	680	323	85	60	748	528	636	449
19	60	38	600	380	510	323	70	60	616	528	524	449
20	60	38	600	380	510	323	70	60	616	528	524	449
21	50	38	500	380	425	323	65	60	572	528	486	449
22	50	38	500	380	425	323	65	60	572	528	486	449
23	50	38	500	380	425	323	65	60	572	528	486	449
24	45	38	450	380	383	323	63	60	554	528	471	449
Енергія за добу			16 850	7 950	14 323	6 758			16 720	12 038	14 212	10 233

Табл. 3.12. Розрахунок режимів роботи компенсуючих пристроїв та добового споживання реактивної електроенергії верстатобудівного підприємства.

	З и м а															
	р о б о ч а д о б а								в и х і д н а д о б а							
	Qкн	Qкв вимкнен	Qкп.дв вимкнен	Qкп.піч. вимкнен	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ	Qкн	Qкв вимкнен	Qкп.дв вимкнен	Qкп.піч. вимкнен	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ
1	50	0	0	0	0	50	504	1,121	50	0	0	0	0	50	478	0,905
2	50	0	0	0	0	50	504	1,121	50	0	0	0	0	50	478	0,905
3	50	0	0	0	0	50	504	1,121	50	0	0	0	0	50	478	0,905
4	50	0	0	0	0	50	504	1,121	50	0	0	0	0	50	478	0,905
5	50	0	0	0	0	50	522	1,044	50	0	0	0	0	50	478	0,905
6	50	0	0	0	0	50	522	1,044	50	0	0	0	0	50	478	0,905
7	50	0	0	0	0	50	698	0,873	50	0	0	0	0	50	478	0,905
8	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	478	0,905
9	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	408	0,891
10	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	408	0,891
11	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	408	0,891
12	50	0	0	0	0	50	698	0,873	50	0	0	0	0	50	408	0,891
13	50	0	0	0	0	50	742	0,824	50	0	0	0	0	50	408	0,891
14	50	0	0	0	0	50	786	0,873	50	0	0	0	0	50	408	0,891
15	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	408	0,891
16	50	0	0	0	0	50	830	0,830	50	0	0	0	0	50	408	0,891
17	50	0	0	0	0	50	742	0,824	50	0	0	0	0	50	408	0,891
18	50	0	0	0	0	50	698	0,873	50	0	0	0	0	50	478	0,905
19	50	0	0	0	0	50	566	0,943	50	0	0	0	0	50	478	0,905
20	50	0	0	0	0	50	566	0,943	50	0	0	0	0	50	478	0,905
21	50	0	0	0	0	50	522	1,044	50	0	0	0	0	50	478	0,905
22	50	0	0	0	0	50	522	1,044	50	0	0	0	0	50	478	0,905
23	50	0	0	0	0	50	522	1,044	50	0	0	0	0	50	478	0,905
24	50	0	0	0	0	50	504	1,121	50	0	0	0	0	50	478	0,905
							15 520	0,9211							10 838	1,3633

Продовження табл. 3.12.

Л і т о															
р о б о ч а д о б а								в и х і д н а д о б а							
Qкн	Qкв	Qкп.дв	Qкп.піч.	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ	Qкн	Qкв	Qкп.дв	Qкп.піч.	Qmax.сд	Qкп.рег	Qес	tgφ
	увімкне	вимкне	вимкне						вимкне	вимкне	вимкне				
50	0	0	0	0	50	421	1,101	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	421	1,101	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	421	1,101	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	421	1,101	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	436	1,026	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	436	1,026	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	586	0,861	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	586	0,861	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	623	0,815	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	661	0,864	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	698	0,821	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	623	0,815	50	0	0	0	0	50	339	1,595
50	0	0	0	0	50	586	0,861	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	474	0,929	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	474	0,929	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	436	1,026	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	436	1,026	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	436	1,026	50	0	0	0	0	50	399	1,235
50	0	0	0	0	50	421	1,101	50	0	0	0	0	50	399	1,235
						13 012	0,9085							9 033	1,3367

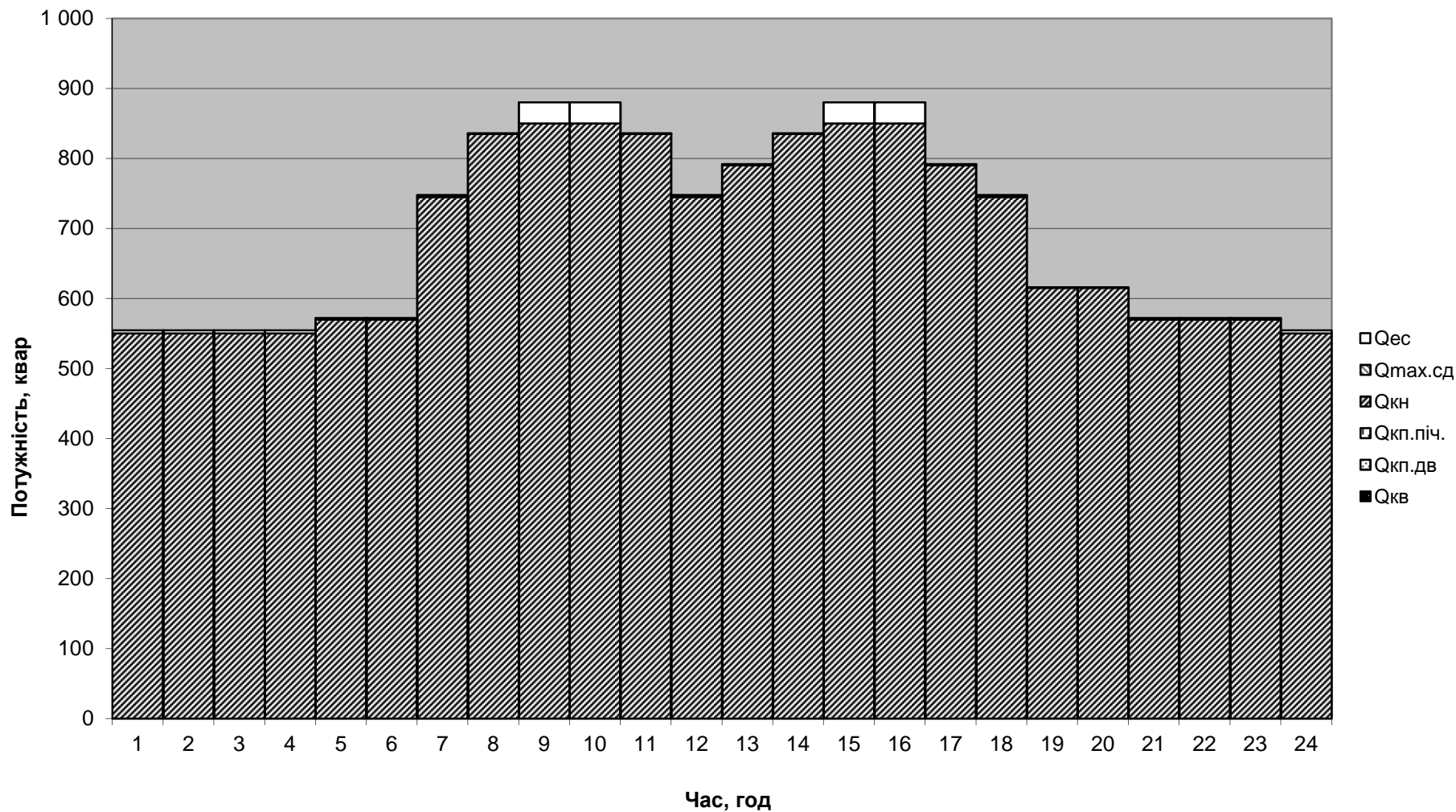


Рис. 3.8. Графік споживання і генерації реактивної потужності за зимову робочу добу для верстатобудівного підприємства ($Q_{кп} = 850$ квар).

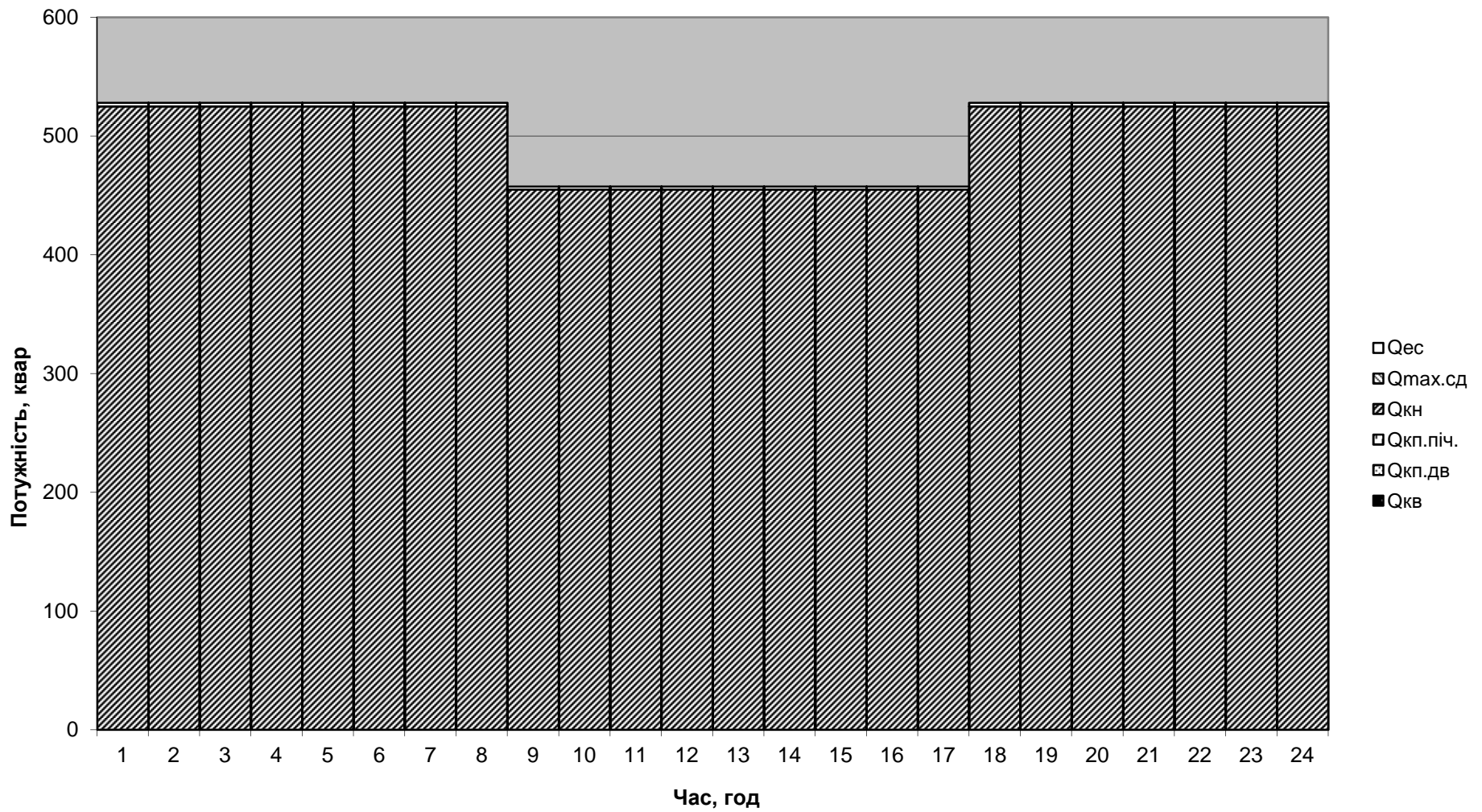


Рис. 3.9. Графік споживання і генерації реактивної потужності за зимову вихідну добу для верстатобудівного підприємства ($Q_{кп} = 850$ квар).

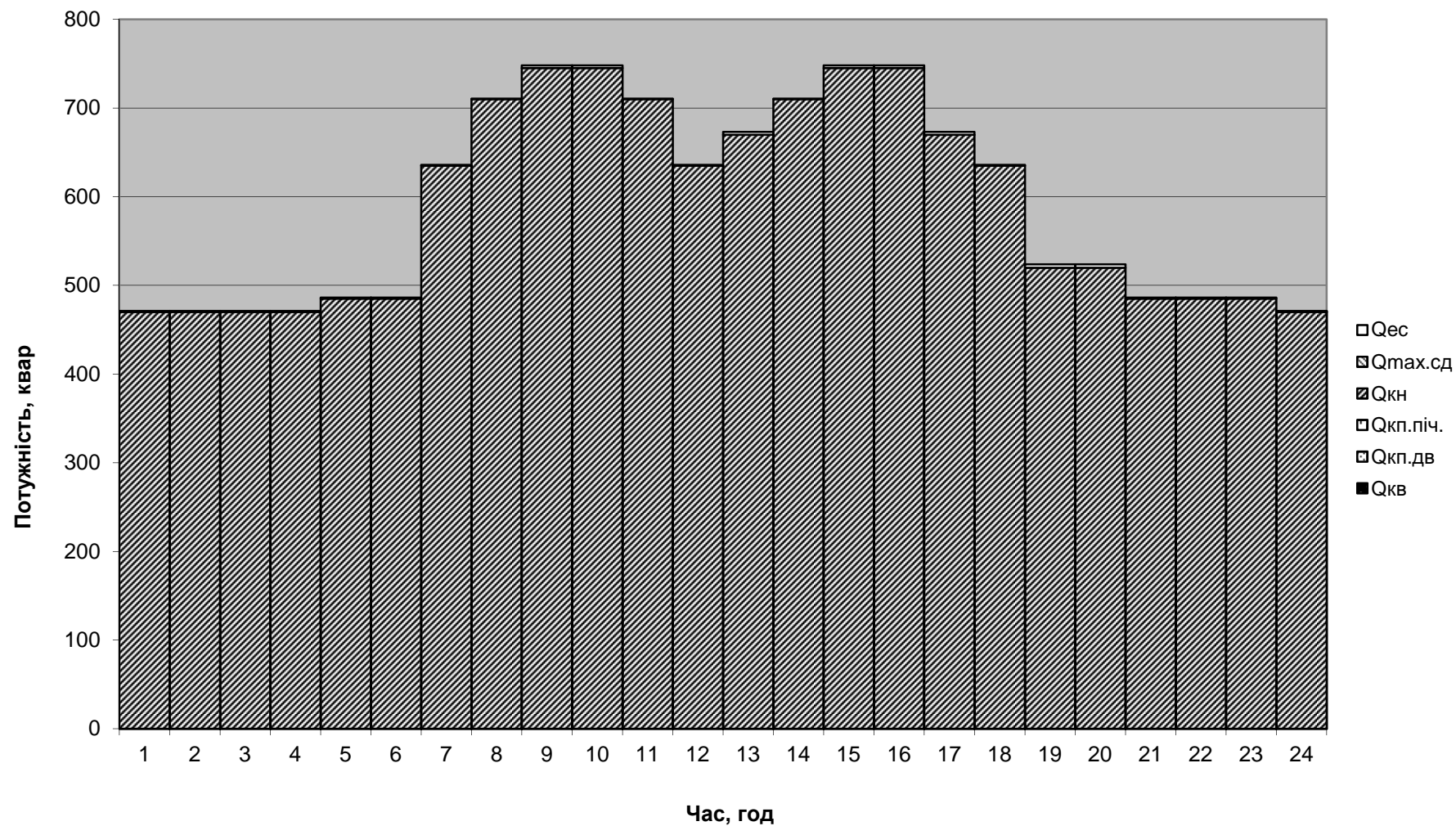


Рис. 3.10. Графік споживання і генерації реактивної потужності за літню робочу добу для верстатобудівного підприємства ($Q_{кп} = 850$ квар).

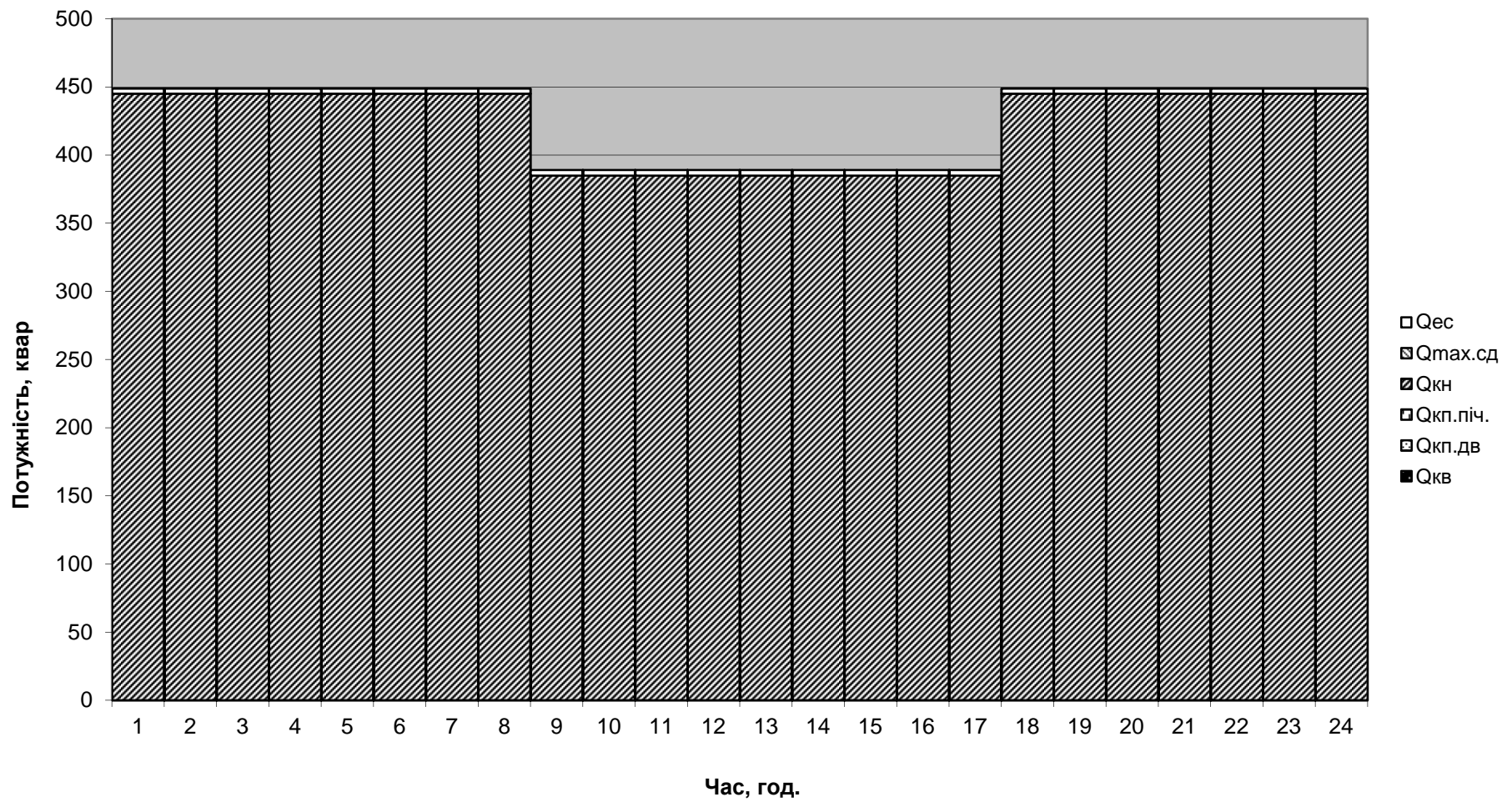


Рис. 3.11. Графік споживання і генерації реактивної потужності за літню вихідну добу для верстатобудівного підприємства ($Q_{кп} = 850$ квар).

$$\operatorname{tg}\varphi = WQ_p/WP_p = 4785763/4821922,5 = 0,993.$$

Плата за перетікання реактивної енергії на рік при даному рівні компенсації реактивної потужності для верстатобудівного підприємства складе:

$$П = П_1 + П_2 = 1481672 + 816857 = 2298529 \text{ грн.}$$

Розрахунок річної плати за перетікання реактивної енергії при інших рівнях компенсації реактивної потужності (інших потужностях батарей конденсаторів) є подібним і в даній роботі не наводиться. А результати цього розрахунку наведені в підсумковій таблиці – табл. 3.13.

Табл. 3.13. Результати розрахунку річної плати за перетікання реактивної енергії при різних рівнях компенсації реактивної потужності для верстатобудівного підприємства.

$Q_{\text{КУ}}$, квар	WQ_p , квар·год	$\operatorname{tg}\varphi$	$П_1$, грн.	$П_2$, грн.	$П$, грн.
50	4785763	0,993	1481672	816857	2298529
70	4610563	0,956	1427430	711819	2139249
100	4347763	0,902	1346067	571632	1917700
140	3997363	0,829	1237583	414885	1652469
200	3471763	0,720	1074858	237432	1312289
320	2420563	0,502	749406	47587	796993
400	1728403	0,358	535113	6293	541407
600	590713	0,123	182885	0	182885
800	226243	0,047	70045	0	70045
850	38293	0,008	11855	0	11855

Розрахуємо цільову функцію (2.6) скориставшись результатами обчислень з табл. 3.2 і 3.13. Так, наприклад, при $Q_{\text{КУ}} = 50$ квар і комплектації ЕТІ+Novar сумарні витрати складуть:

$$B(50) = \Pi_{\text{кп}}(50) + \Pi(50) = 24523,52 + 2298529 = \text{грн.}$$

Розрахунок значень цільової функції при інших потужностях батарей конденсаторів та іншій комплектації є подібним. Результати цього розрахунку наведені в табл. 3.14.

Табл. 3.14. Результати розрахунку цільової функції при різних рівнях компенсації реактивної потужності для верстатобудівного підприємства.

$Q_{\text{кв}},$ квар	$B, \text{ грн.}$		tgφ в режимі max навантаження
	ЕТІ+Novar	ЕТІ+ТМ Електро	
50	2323052,52	2312797,8	0,83
70	2165591,4	2156026,6	0,81
100	1950377,12	1939432,48	0,78
140	1685083,4	1678874,12	0,74
200	1354060,52	1343209,96	0,68
320	857110,12	851559,4	0,56
400	610273,56	597855	0,48
600	274456,2	252096,52	0,28
800	193979,72	168985,8	0,08
850	160313,24	125064,6	0,03

Також для аналітики розраховано значення tgφ в режимі max навантаження. Результати розрахунку зведені в табл. 3.14.

За даними табл. 3.14 побудовані графіки залежності цільової функції від рівня компенсації реактивної потужності рис. 3.12 та tgφ в режимі max навантаження рис. 3.13.

Аналіз графіків рис. 3.12 і 3.13 дозволяє зробити такі висновки. Аналогічно, як і для підприємства чорної металургії для верстатобудівної промисловості раціональним є застосування глибокої, практично повної компенсації реактивної потужності. Це обумовлюється аналогічними факторами, як і для підприємств чорної металургії, а саме високою вартістю на електричну енергію та низькою вартістю батарей конденсаторів.

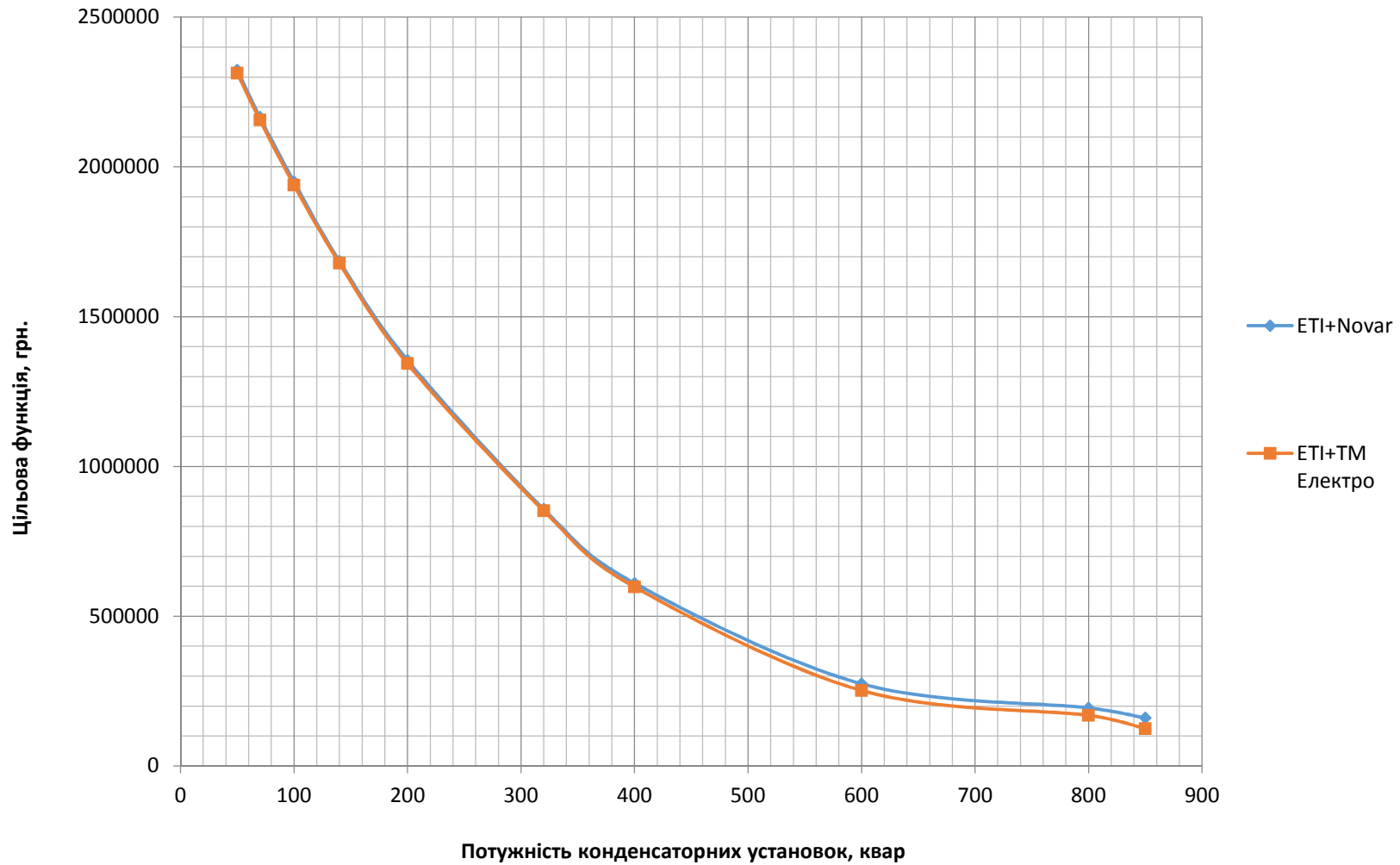


Рис. 3.12. Графік залежності цільової функції від рівня компенсації реактивної потужності (потужності батарей конденсаторів) для верстатобудівного підприємства.

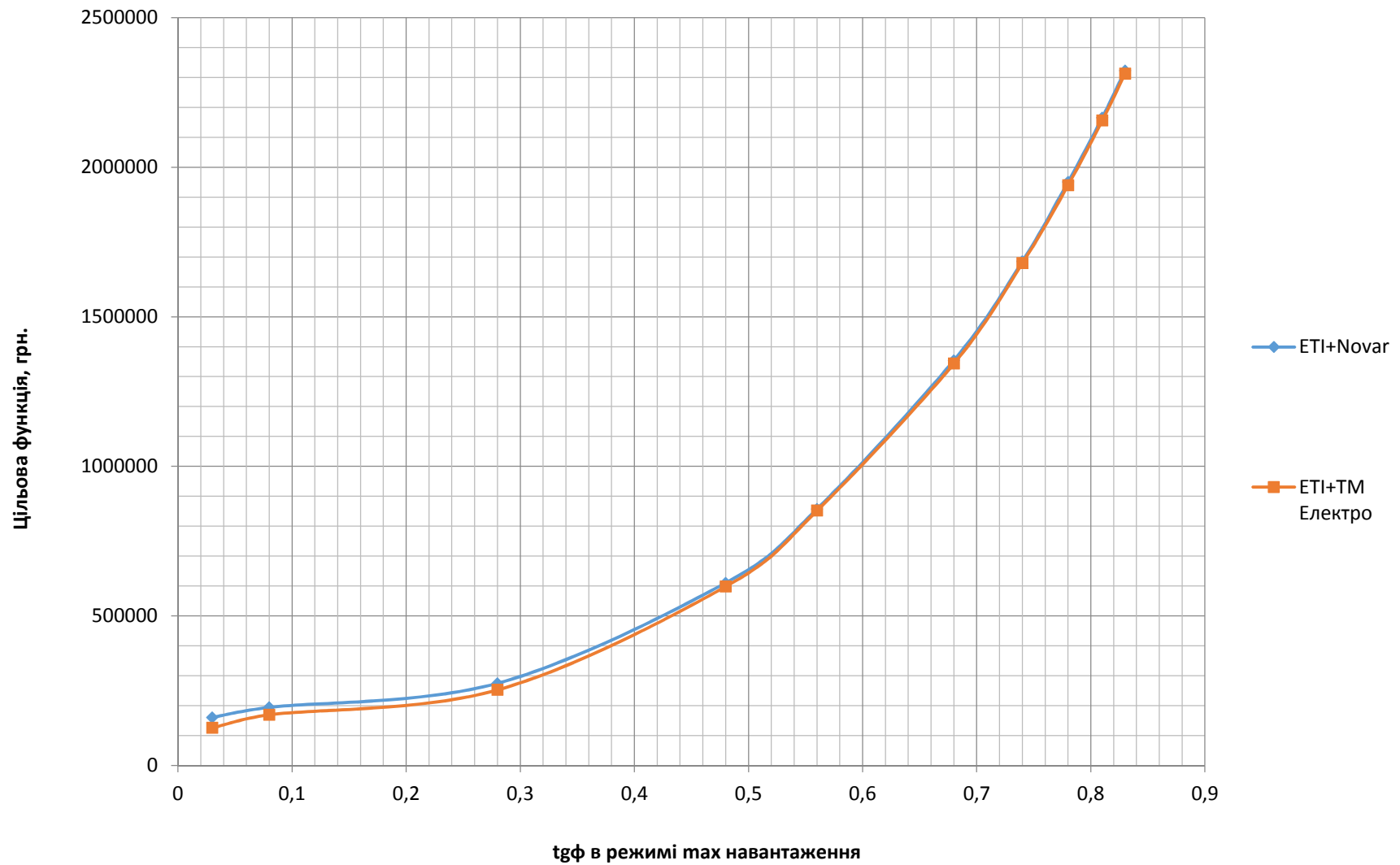


Рис. 3.13. Графік залежності цільової функції від $\text{tg}\phi$ в режимі max навантаження для верстатобудівного підприємства.

3.5 Аналіз впливу вартості електричної енергії на рівень компенсації реактивної потужності

В попередніх розрахунках використано вартість електричної енергії по першому класу напруги, яка складає 10,32 грн./кВт·год. Це є достатньо високою величиною, яка відповідно призводить до високої плати за перетоки реактивної енергії. Проаналізуємо, як впливає вартість електричної енергії на рівень компенсації реактивної потужності. Для цього обчислимо плату за перетоки реактивної енергії при різних вартостях активної електричної енергії для підприємства чорної металургії та верстатобудівного підприємства. Для розрахунків використаємо менші значення вартості електричної енергії – 8, 6 та 4 грн./кВт·год. Результати розрахунку для підприємства чорної металургії наведені в табл. 3.15, а верстатобудівного підприємства в табл. 3.16.

Розрахуємо цільову функцію (2.6) скориставшись результатами обчислень з табл. 3.2, 3.15 і 3.16. Розрахунок значень цільової функції є подібним до проведених раніше і тут не наводиться.

Табл. 3.15. Результати розрахунку річної плати за перетікання реактивної енергії при різних рівнях компенсації реактивної потужності та вартості електричної енергії для підприємства чорної металургії.

$Q_{ку}$, квар	Π , грн.			
	$\zeta = 10,32$ грн./ кВт·год	$\zeta = 8$ грн./ кВт·год	$\zeta = 6$ грн./ кВт·год	$\zeta = 4$ грн./ кВт·год
50	2599897	2016292	1512219	1008146
70	2458613	1906045	1429534	953023
100	2258781	1750235	1312676	875118
140	2013610	1560601	1170451	780301
200	1687405	1307662	980747	653831
320	1160002	899370	674527	449685
400	879486	681715	511286	340857
600	364983	282933	212199	141466
800	93647	72594	54446	36297
850	13539	10495	7872	5248

Табл. 3.16. Результати розрахунку річної плати за перетікання реактивної енергії при різних рівнях компенсації реактивної потужності та вартості електричної енергії для верстатобудівного підприємства.

$Q_{ку}$, квар	Π , грн.			
	$\zeta = 10,32$ грн./ кВт·год	$\zeta = 8$ грн./ кВт·год	$\zeta = 6$ грн./ кВт·год	$\zeta = 4$ грн./ кВт·год
50	2323052,52	1807180,5	1361516,5	915852,52
70	2165591,4	1684414,4	1269896,4	855378,4
100	1950377,12	1519720,1	1147960,1	776199,12
140	1685083,4	1313600,4	993354,4	673107,4
200	1354060,52	1059053,5	804733,52	550412,52
320	857110,12	677944,12	523487,12	369030,12
400	610273,56	488521,56	383607,56	278694,56
600	274456,2	233342,2	197899,2	162457,2
800	193979,72	178232,72	164658,72	151083,72
850	160313,24	157648,24	155351,24	153053,24

Результати цього розрахунку наведені в табл. 3.17 і 3.18 відповідно для підприємства чорної металургії та верстатобудівного підприємства. Також при розрахунках використана комплектація ЕТІ+Novar як така, що має більші приведені витрати.

Табл. 3.17. Результати розрахунку цільової функції при різних рівнях компенсації реактивної потужності та вартості електроенергії для підприємства чорної металургії.

$Q_{ку}$, квар	tgφ в режимі max	B , грн.			
		$\zeta = 10,32$ грн./ кВт·год	$\zeta = 8$ грн./ кВт·год	$\zeta = 6$ грн./ кВт·год	$\zeta = 4$ грн./ кВт·год
50	0,83	2624420,52	2040815,5	1536742,5	1032669,52
70	0,81	2484955,4	1932387,4	1455876,4	979365,4
100	0,78	2291458,12	1782912,1	1345353,1	907795,12
140	0,74	2046224,4	1593215,4	1203065,4	812915,4
200	0,68	1729176,52	1349433,5	1022518,5	695602,52
320	0,56	1220119,12	959487,12	734644,12	509802,12
400	0,48	948352,56	750581,56	580152,56	409723,56
600	0,28	456554,2	374504,2	303770,2	233037,2
800	0,08	217581,72	196528,72	178380,72	160231,72
850	0,03	161997,24	158953,24	156330,24	153706,24

Табл. 3.18. Результати розрахунку цільової функції при різних рівнях компенсації реактивної потужності та вартості електроенергії для верстатобудівного підприємства.

$Q_{ку}$, квар	tgφ в режимі max	B, грн.			
		$C = 10,32$ грн./ кВт·год	$C = 8$ грн./ кВт·год	$C = 6$ грн./ кВт·год	$C = 4$ грн./ кВт·год
50	0,83	2323052,52	1807180,5	1361516,5	915852,52
70	0,81	2165591,4	1684414,4	1269896,4	855378,4
100	0,78	1950377,12	1519720,1	1147960,1	776199,12
140	0,74	1685083,4	1313600,4	993354,4	673107,4
200	0,68	1354060,52	1059053,5	804733,52	550412,52
320	0,56	857110,12	677944,12	523487,12	369030,12
400	0,48	610273,56	488521,56	383607,56	278694,56
600	0,28	274456,2	233342,2	197899,2	162457,2
800	0,08	193979,72	178232,72	164658,72	151083,72
850	0,03	160313,24	157648,24	155351,24	153053,24

За даними табл. 3.17 і 3.18 побудовані відповідні графіки залежності цільової функції від tgφ в режимі max навантаження для підприємства чорної металургії на рис. 3.14, а на рис. 3.15 для верстатобудівного підприємства.

Отже, аналіз графіків рис. 3.14 і 3.15 та табл. 3.17 і 3.18 дозволяє зробити такі висновки. Доцільним є застосування глибокої, повної компенсації реактивної потужності. Це обумовлюється низькою вартістю батареї конденсаторів, і зменшення вартості електричної енергії з 10,32 грн./кВт·год навіть до 4 грн./кВт·год фактично не призводить до зміни характеру залежності. Лише при 4 грн./кВт·год та для графіку верстатобудівного підприємства, який характеризується значними змінами протягом доби, стає більш доцільною компенсація при $\text{tg}\phi \approx 0,1$ ніж при 0.

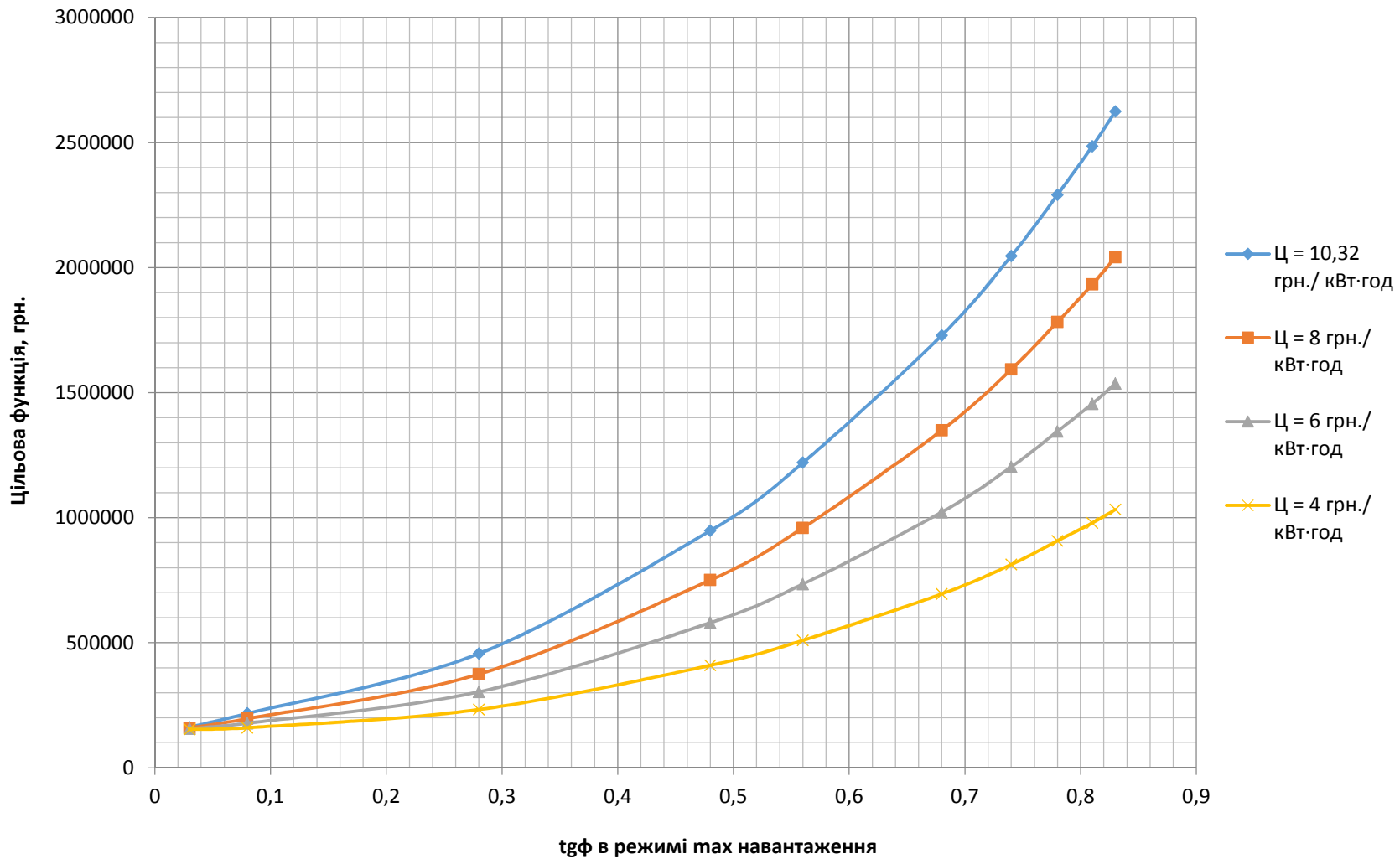


Рис. 3.14. Графік залежності цільової функції від tgφ в режимі max навантаження для підприємства чорної металургії при різних вартостях електроенергії.

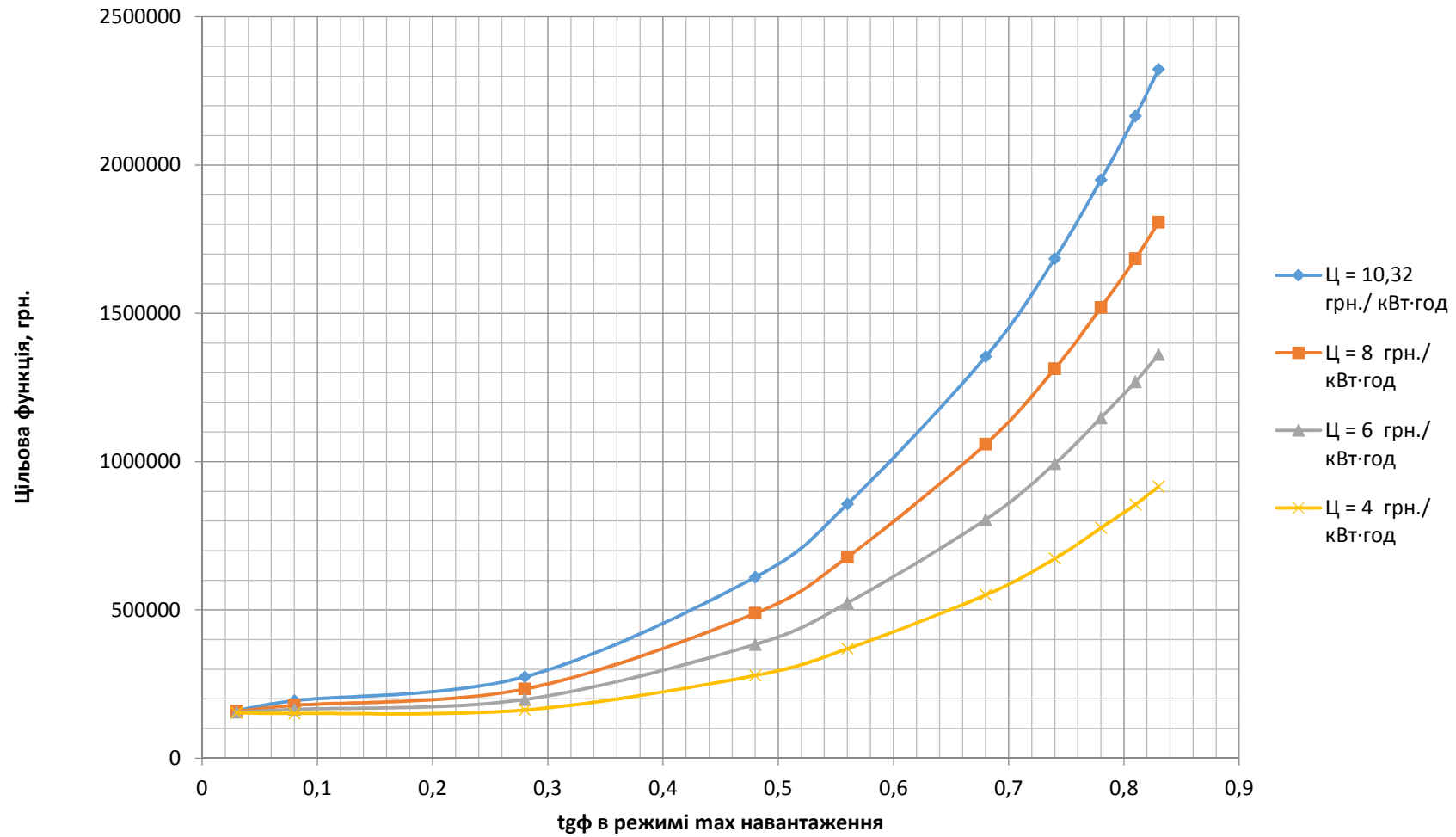


Рис. 3.15. Графік залежності цільової функції від tgφ в режимі max навантаження для верстатобудівного підприємства при різних вартостях електроенергії.

3.6 Аналіз впливу терміну окупності на рівень компенсації реактивної потужності

В попередніх розрахунках при обчисленні приведених річних витрат на компенсуючі пристрої використане значення нормативного коефіцієнту p рівним 0,12, що відповідає поверненню капітальних вкладень за 8 років (12% річної ставки). В той же час нормативний коефіцієнт при розрахунках може бути використаний інший, що відповідає іншому терміну повернення вкладень, наприклад, 4 роки (25% річної ставки) або 3 роки (33,3% річної ставки).

Перерахуємо за формулою (3.2) приведені річні витрати в компенсуючі пристрої (нашому випадку – конденсаторні установки) для різних значень терміну повернення вкладень. Розрахунок проведемо лише для комплектації ETI+Novar, яка є більш дорожчою. Враховуючи, що розрахунок є подібним до проведеного раніше він не наводиться, а результати представлені в табл. 3.19.

Табл. 3.19. Результати розрахунку приведених річних витрат на конденсаторні установки при різних значеннях терміну повернення капітальних вкладень.

Загальна потужність на дві секції, квар	Приведені річні витрати, грн. при терміні повернення капітальних вкладень			
	$T = 8$ років	$T = 5$ років	$T = 4$ років	$T = 3$ років
50	24523,52	30654,40	34486,20	40846,99
70	26342,40	32928,00	37044,00	43876,56
100	32677,12	40846,40	45952,20	54427,83
140	32614,40	40768,00	45864,00	54323,36
200	41771,52	52214,40	58741,20	69575,69
320	60117,12	75146,40	84539,70	100132,58
400	68866,56	86083,20	96843,60	114705,86
600	91571,20	114464,00	128772,00	152523,28
800	123934,72	154918,40	174283,20	206428,77
850	148458,24	185572,80	208769,40	247275,76
870	150277,12	187846,40	211327,20	250305,33

Розрахуємо цільову функцію (2.6) скориставшись результатами обчислень з табл. 3.19 та табл. 3.17 і 3.18 при $C = 10,32$ грн./кВт·год. Враховуючи, що розрахунок значень цільової функції є подібним до проведеного раніше він не наводиться. Результати цього розрахунку наведені в табл. 3.20 і 3.21.

Табл. 3.20. Результати розрахунку цільової функції при різних значеннях терміну повернення капітальних вкладень для підприємства чорної металургії.

Загальна потужність на дві секції, квар	Цільова функція, грн. при терміні повернення капітальних вкладень			
	$T = 8$ років	$T = 5$ років	$T = 4$ років	$T = 3$ років
50	2648944	2655075	2658907	2665268
70	2511298	2517883	2521999	2528832
100	2324135	2332305	2337410	2345886
140	2078839	2086992	2092088	2100548
200	1770948	1781391	1787918	1798752
320	1280236	1295266	1304659	1320252
400	1017219	1034436	1045196	1063058
600	548125	571018	585326	609077
800	341516	372500	391865	424010
850	310455	347570	370767	409273

Табл. 3.21. Результати розрахунку цільової функції при різних значеннях терміну повернення капітальних вкладень для верстатобудівного підприємства.

Загальна потужність на дві секції, квар	Цільова функція, грн. при терміні повернення капітальних вкладень			
	$T = 8$ років	$T = 5$ років	$T = 4$ років	$T = 3$ років
50	2347576	2353707	2357539	2363900
70	2191934	2198519	2202635	2209468
100	1983054	1991224	1996329	2004805
140	1717698	1725851	1730947	1739407
200	1395832	1406275	1412802	1423636
320	917227	932257	941650	957243
400	679140	696357	707117	724979
600	366027	388920	403228	426979
800	317914	348898	368263	400408
850	308771	345886	369083	407589

За даними табл. 3.20 і 3.21 побудовані відповідні графіки залежності цільової функції від $\text{tg}\varphi$ в режимі max навантаження для підприємства чорної металургії рис. 3.16 і верстатобудівного підприємства рис. 3.17.

Аналіз графіків рис. 3.16 і 3.17 та даних табл. 3.20 і 3.21 дозволяє зробити такі висновки:

– Зменшення терміну повернення капіталовкладень для графіку підприємства чорної металургії, який є малозмінним залишає більш економічно вигідною повну компенсацію реактивної потужності.

– Більш змінний графік навантаження верстатобудівного підприємства при зменшенні терміну повернення капіталовкладень робить цільову функцію в межах тангенсу від 0 до 0,25 майже пологою. При терміні повернення 8 років для даного графіку залишається більш економічно вигідним повна компенсація реактивної потужності. При терміні повернення капіталовкладень п'ять років робить криву у вказаному діапазоні пологою, що говорить, що зона оптимального тангенсу в режимі максимальних навантажень робиться в певних межах. При терміні повернення 3-4 роки оптимальним тангенс є біля 0,1.

3.7 Висновки

1. Запропонована методика обґрунтовує оптимальний рівень компенсації, як точку мінімуму сукупних витрат, отриману шляхом порівняння вартості конденсаторних установок і плати за реактивну енергію, що забезпечує раціональний баланс між економією електроенергії та капітальними вкладеннями.

2. Розраховані приведені річні витрати на конденсаторні установки, що включають амортизаційні і експлуатаційні відрахування, повернення капіталовкладень, що дозволяє визначити економічно обґрунтовану потужність компенсуючих пристроїв.

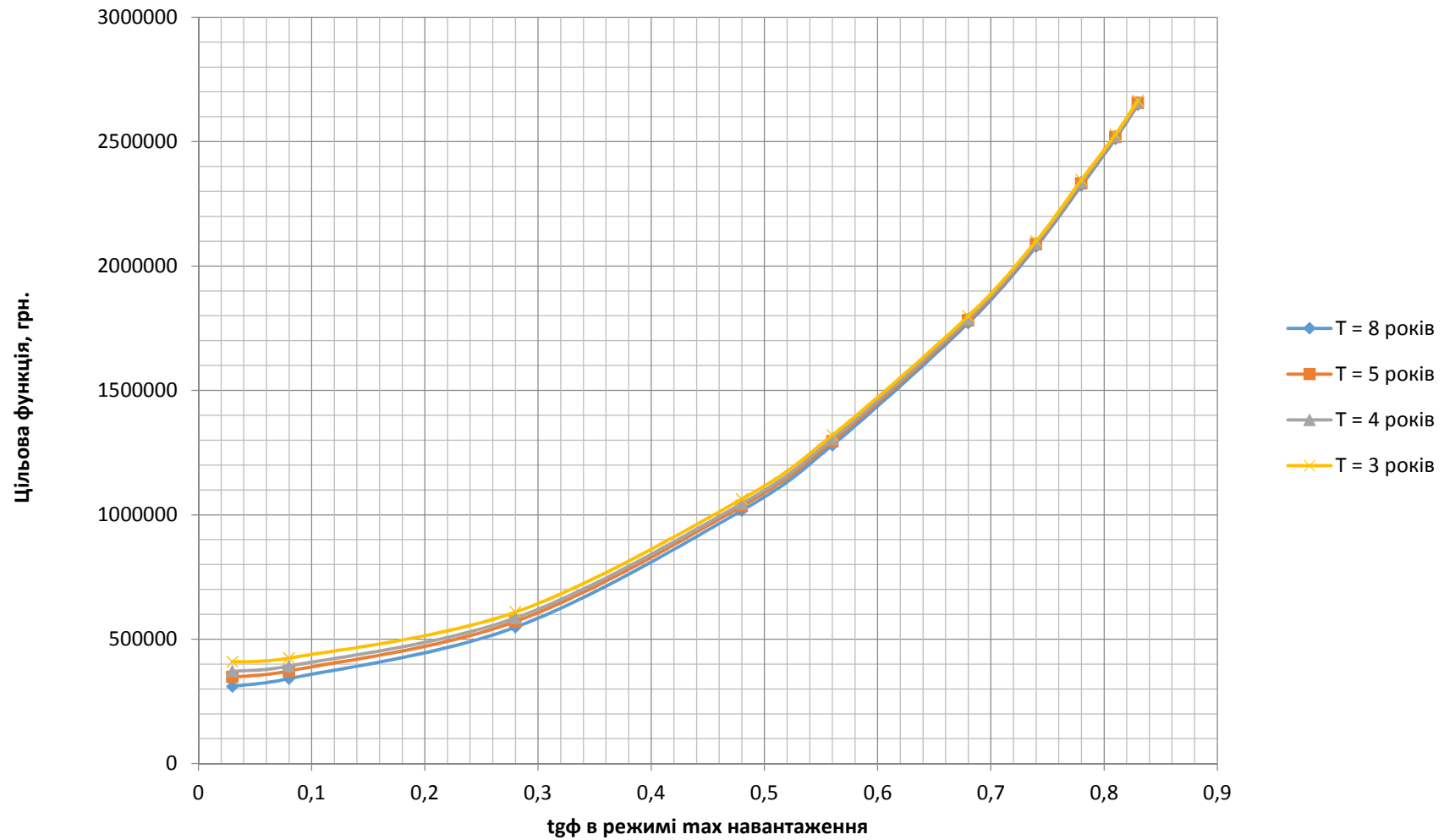


Рис. 3.16. Графік залежності цільової функції від $\text{tg}\phi$ в режимі max навантаження для підприємства чорної металургії при різних значеннях терміну повернення капітальних вкладень.

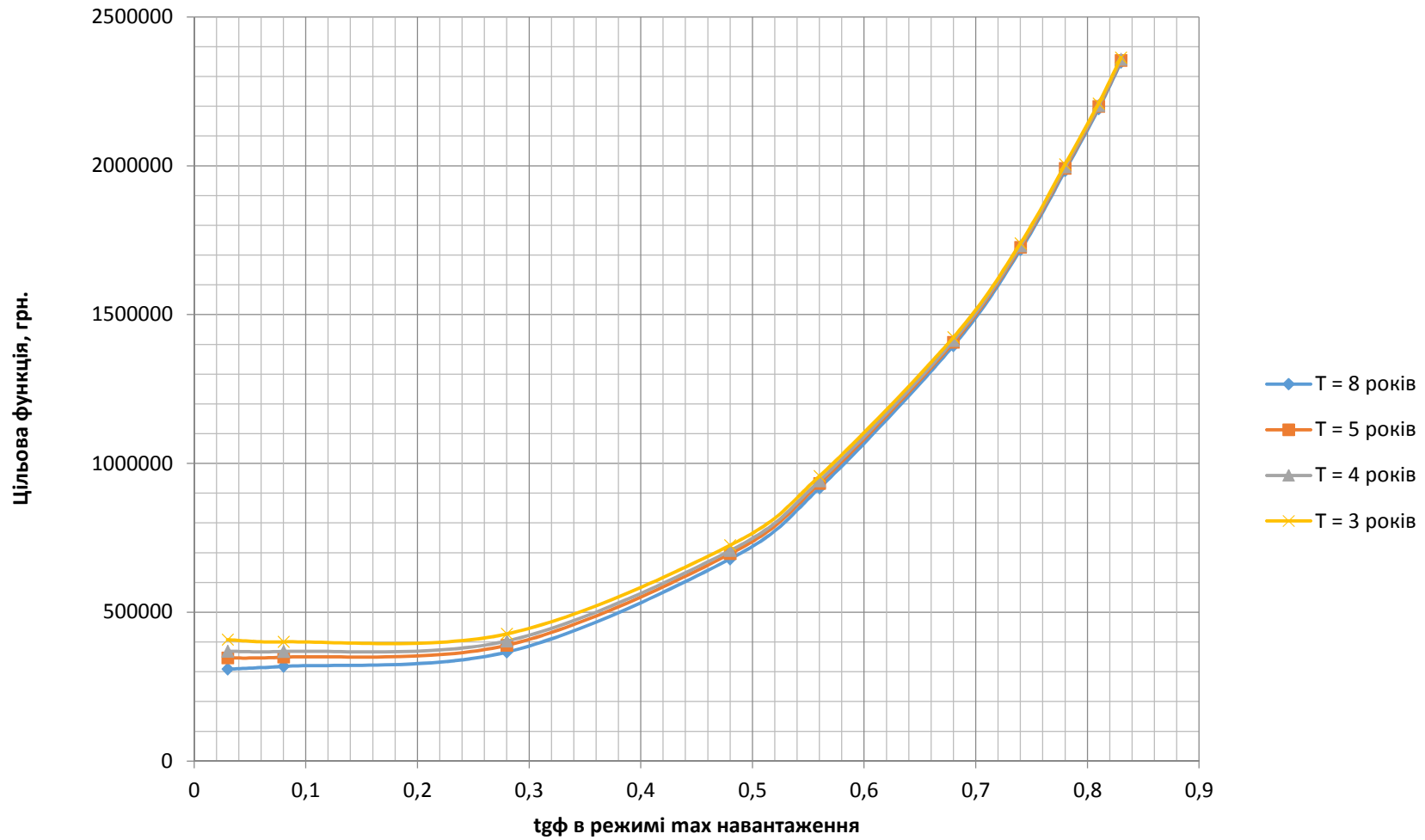


Рис. 3.17. Графік залежності цільової функції від tgφ в режимі max навантаження для верстатобудівного підприємства при різних значеннях терміну повернення капітальних вкладень.

3. Розрахунок оптимального рівня компенсації реактивної потужності для підприємства чорної металургії виявив, що через рівномірність добового графіка навантаження підприємству економічно доцільно застосовувати майже повну компенсацію, оскільки встановлені батареї конденсаторів працюють із високим рівнем завантаження упродовж усього року.

4. Визначення оптимального рівня компенсації для верстатобудівного підприємства показало, що незважаючи на значну змінність навантажень протягом доби, застосування глибокої компенсації також є економічно виправданим, що зумовлено високою вартістю електроенергії та відносно низькою ціною конденсаторних установок.

5. Дослідження впливу вартості електричної енергії на глибину компенсації продемонструвало, що навіть істотне зниження тарифу на електроенергію (з 10,32 до 4 грн/кВт·год) не змінює загальної тенденції: оптимальною залишається глибока компенсація, за винятком окремих режимів для навантажень зі значною добовою нерівномірністю, де може бути доцільним залишення невеликої частини реактивної потужності некомпенсованою ($\text{tg}\varphi \approx 0,1$).

6. Аналіз впливу терміну окупності капітальних вкладень показав, що скорочення терміну повернення інвестицій підвищує приведені витрати на обладнання, однак для підприємств із сталими навантаженнями (чорна металургія) оптимальною залишається повна компенсація реактивної потужності. Для підприємств зі змінними графіками навантаження зона економічної доцільності компенсації розширюється ($\text{tg}\varphi$ від 0 до 0,25), а при коротких термінах окупності (3–4 роки) оптимальний $\text{tg}\varphi$ зміщується до значення близько 0,1.

7. Розроблена методика може бути використана як універсальний інструмент для техніко-економічного обґрунтування систем компенсації у промислових енергетичних комплексах різного типу.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організаційні та правові засади електробезпеки на підприємстві

Електробезпека на сучасному промисловому підприємстві ґрунтується на поєднанні правових вимог національного законодавства України та організаційних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці при експлуатації електроустановок. Система електробезпеки є складовою загальної системи управління охороною праці та передбачає попередження ураження електричним струмом, запобігання аваріям і професійним захворюванням.

Нормативно-правову базу у сфері електробезпеки становлять Конституція України, Кодекс законів про працю України, Закон України «Про охорону праці», Закон України «Про ринок електричної енергії», а також галузеві та міжгалузеві нормативно-правові акти з охорони праці. Спеціальне регулювання питань безпечної експлуатації електроустановок здійснюється «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів», «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів», вимогами ДБН, ДСТУ та іншими НПАОП, що встановлюють обов'язкові для виконання вимоги щодо організації робіт в електроустановках.

Відповідно до законодавства, роботодавець несе повну відповідальність за створення безпечних умов праці та належний технічний стан електрообладнання. На підприємстві наказом керівника призначається відповідальний за електрогосподарство, який організовує експлуатацію електроустановок, контроль за дотриманням вимог нормативних документів, своєчасне технічне обслуговування, ремонти та випробування. Для виконання цих функцій формуються електротехнічні та електротехнологічні служби, затверджуються їх структура, підпорядкованість та зона відповідальності.

Важливим елементом організаційних засад електробезпеки є розроблення і впровадження на підприємстві локальної нормативної документації: положення про електрогосподарство, інструкцій з охорони праці за професіями і видами робіт, схем організаційної структури служби електрогосподарства, порядку допуску до роботи в електроустановках, журнальних форм обліку інструктажів, оглядів та випробувань. Зазначені документи узгоджуються з чинними державними нормативами та доводяться до відома працівників під розпис.

Організація електробезпеки передбачає систему навчання, інструктажу та перевірки знань працівників. Особи, які обслуговують електроустановки або виконують роботи поблизу діючих електроустановок, повинні мати відповідну групу з електробезпеки, яка присвоюється за результатами спеціального навчання і перевірки знань комісією підприємства. Періодична перевірка знань здійснюється не рідше одного разу на рік для оперативного та ремонтного персоналу та не рідше одного разу на три роки – для інженерно-технічних працівників. Понад те, обов'язковими є первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі з електробезпеки.

Окреме місце в організаційних засадах електробезпеки посідає порядок виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями або в порядку поточної експлуатації. Наряд-допуск є основним документом, що регламентує безпечне проведення робіт підвищеної небезпеки: він визначає склад бригади, обсяг і місце робіт, необхідні технічні заходи з підготовки робочого місця, перелік захисних засобів та відповідальних осіб. На підприємстві затверджується перелік робіт, що виконуються за нарядами, порядок їх оформлення, зберігання та аналізу.

Система електробезпеки включає також розподіл персоналу на категорії: електротехнічний, електротехнологічний та неелектротехнічний персонал, які мають різні права і обов'язки щодо доступу до електроустановок. Для кожної категорії встановлюються чіткі вимоги до

кваліфікації, стажу роботи, проходження медичних оглядів. Працівники, які мають медичні протипоказання до роботи в умовах впливу електричного струму, до виконання таких робіт не допускаються.

Важливою організаційною вимогою є забезпечення працівників сертифікованими засобами індивідуального та колективного захисту (діелектричні рукавички, калоші, килими, ізолювальні штанги, покажчики напруги, переносні заземлення тощо), а також ведення їх обліку, періодичних випробувань і своєчасної заміни. Усі захисні засоби повинні застосовуватися згідно з інструкціями виробника та внутрішніми інструкціями підприємства.

Організаційні та правові засади електробезпеки передбачають також систему розслідування та обліку нещасних випадків, пов'язаних з ураженням електричним струмом. Порядок розслідування визначається чинними нормативними актами з охорони праці та включає встановлення причин події, аналіз порушень вимог безпеки, розроблення та впровадження коригувальних заходів. Результати розслідувань використовуються для актуалізації інструкцій, програм навчання та технічних рішень, спрямованих на недопущення повторення подібних випадків.

Таким чином, організаційні та правові засади електробезпеки на підприємстві утворюють цілісну систему, що базується на вимогах національного законодавства, галузевих нормативно-правових актів та внутрішніх регламентів. Її ефективність визначається не лише наявністю формально затверджених документів, а й реальним функціонуванням механізмів управління електробезпекою, постійним навчанням персоналу та систематичним контролем за дотриманням встановлених вимог.

4.2 Основні причини електротравматизму

Електротравматизм є однією з найнебезпечніших складових виробничого травматизму, оскільки наслідки ураження електричним струмом часто є тяжкими або летальними навіть за короткочасного впливу. Аналіз причин електротравм на підприємствах свідчить, що переважна їх частина є

наслідком поєднання технічних, організаційних та людських факторів. Виявлення та систематизація цих причин є необхідною умовою розроблення ефективних заходів профілактики.

1 Технічні причини електротравматизму

До технічних причин електротравматизму належать:

- Пошкодження або зниження опору ізоляції струмопровідних частин. Старіння ізоляційних матеріалів, механічні пошкодження кабелів, вплив вологи, агресивних середовищ, підвищеної температури призводять до виникнення струмів витоку та небезпечної напруги на доступних частинах обладнання.

- Відсутність або несправність захисного заземлення та занулення. Неправильне підключення, корозія заземлювальних провідників, обриви захисних провідників призводять до підвищення напруги дотику при пошкодженні ізоляції та ураження персоналу.

- Недостатня ефективність захисних апаратів. Невірний вибір уставок автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення, відсутність селективності захистів, застосування застарілих запобіжників з тривалим часом спрацювання збільшують тривалість протікання аварійних струмів через тіло людини.

- Конструктивні недоліки електроустановок. Відсутність огорожень струмопровідних частин, невідповідність ступеня захисту оболонок умовам експлуатації, наявність відкритих шинопроводів у зонах можливого доступу персоналу підвищують ймовірність випадкового доторкання до струмопровідних частин.

- Застосування несправних переносних електроприймачів та подовжувачів. Пошкоджені вилки, розетки, порвані оболонки проводів, кустарні з'єднання створюють небезпеку як прямого дотику, так і виникнення дугових розрядів та пожеж.

Таким чином, технічні причини пов'язані насамперед із незадовільним станом електрообладнання, порушенням вимог електробезпеки при проектуванні, монтажі та експлуатації електроустановок.

2. Організаційні причини електротравматизму

Значну частку електротравм становлять випадки, безпосередньо пов'язані з недоліками в організації робіт:

- Порушення порядку допуску до робіт в електроустановках. Виконання робіт без наряду-допуску, розпорядження або відповідного запису в журналі, відсутність чіткого розподілу обов'язків між членами бригади призводять до помилкових дій персоналу.

- Недостатній контроль з боку відповідальних осіб. Формальний характер оперативного керівництва, відсутність періодичних перевірок стану електроустановок, несвоєчасне усунення виявлених недоліків створюють умови для накопичення потенційно небезпечних дефектів.

- Неналежна організація навчання та інструктажів. Несвоєчасне проведення первинних, повторних, позапланових інструктажів, формальний підхід до перевірки знань правил безпечної експлуатації електроустановок, відсутність тренувань щодо дій в аварійних ситуаціях знижують рівень готовності персоналу до безпечної роботи.

- Порушення вимог щодо допуску за електротехнічною кваліфікацією. Допуск працівників без належної групи з електробезпеки або з простроченим терміном перевірки знань до виконання робіт в електроустановках під напругою чи поблизу них є фактором підвищеного ризику.

Організаційні недоліки, як правило, виступають фоновою причиною, яка сприяє реалізації технічних та людських помилок у реальні електротравми.

3. Психофізіологічні та поведінкові причини

До цієї групи причин відносять фактори, пов'язані з людським чинником:

- Порушення трудової та технологічної дисципліни. Свідоме ігнорування вимог інструкцій, виконання робіт «за звичкою», обходження блокувань, огорожень, невикористання засобів індивідуального захисту (діелектричних рукавиць, килимків, інструменту з ізольованими ручками) є одними з найпоширеніших причин ураження.

- Переоцінка власних знань і досвіду. Досвідчені працівники часто нехтують «елементарними» заходами безпеки, вважаючи їх зайвими, що призводить до помилок у нестандартних або аварійних ситуаціях.

- Втома, стрес, знижена концентрація уваги. Робота у понаднормовому режимі, в нічні зміни, у несприятливих метеорологічних та виробничих умовах (шум, вібрація, висока температура) сприяє виникненню неуважності, помилкових дій та затримки реакції.

- Недостатня мотивація до дотримання вимог безпеки. Відсутність системи заохочень за безпечну поведінку та відповідальності за порушення правил призводить до формування толерантності до ризику в трудовому колективі.

Таким чином, навіть за технічно справних електроустановок та правильно організованого виробничого процесу людський фактор може виступати визначальною причиною електротравми.

4. Експлуатаційні та технологічні причини

До експлуатаційних причин належать:

- Несвоєчасне технічне обслуговування та ремонт електрообладнання. Порушення регламентів планово-попереджувальних ремонтів, відсутність періодичних випробувань ізоляції, заземлювальних пристроїв та засобів захисту призводять до накопичення прихованих дефектів.

- Експлуатація обладнання поза межами допустимих режимів. Перевантаження трансформаторів, кабельних ліній, робота апаратури у середовищах, для яких вона не призначена, сприяють прискореному зносу ізоляції та виникненню аварійних режимів.

- Порушення технології виконання робіт. Проведення монтажних, налагоджувальних або ремонтних робіт під напругою без необхідної потреби, застосування невідповідного інструменту, відсутність огороження робочої зони створюють додаткові ризики.

- Неналежний стан робочого місця. Наявність сторонніх предметів, вологи на підлозі, металевих конструкцій поблизу струмопровідних частин, недостатнє освітлення ускладнюють безпечне виконання операцій та підвищують імовірність випадкового контакту з частинами, що знаходяться під напругою.

Експлуатаційні причини є наслідком систематичних відхилень від вимог нормативних документів та інструкцій, що у довгостроковій перспективі неминуче приводить до аварійних ситуацій.

5. Зовнішні та супутні фактори

На рівень електротравматизму також впливають зовнішні чинники:

- Атмосферні перенапруги та аварії в мережі. Наслідки грозових перенапруг, обриви проводів, неякісні контакти в розподільчих пристроях можуть призвести до появи небезпечної напруги на відкритих провідних частинах.

- Особливості середовища. Підвищена вологість, запиленість, наявність хімічно активних газів погіршують електричну міцність ізоляції та збільшують струм через тіло людини при дотику.

- Суміжні роботи інших підрозділів. Проведення будівельно-монтажних, вантажопідіймальних або ремонтних робіт поблизу діючих електроустановок без належної координації дій підвищує ризик випадкового пошкодження кабелів, шин, ізоляторів.

Отже, електротравматизм на підприємстві зумовлений комплексною дією технічних, організаційних, психофізіологічних та зовнішніх факторів. Усунення або мінімізація кожної з перелічених причин шляхом удосконалення конструкції електроустановок, підвищення рівня організації робіт, систематичного навчання персоналу та жорсткого дотримання вимог

електробезпеки є ключовою передумовою зниження рівня електротравматизму.

4.3 Наслідки ураження електричним струмом

Ураження електричним струмом належить до найбільш небезпечних видів виробничого травматизму, оскільки може призводити як до тяжких функціональних порушень організму людини, так і до миттєвої смерті. Характер та ступінь наслідків визначаються величиною і родом струму, тривалістю його дії, шляхом проходження через тіло людини, станом організму, а також умовами навколишнього середовища (вологість, температура, наявність струмопровідного пилу тощо).

Основні види дії електричного струму на організм людини включають:

- біологічну дію – збудження та порушення нормальної діяльності нервової системи, м'язів, серця і дихального апарату;
- термічну дію – нагрівання тканин, утворення опіків, обвуглення шкіри, ушкодження судин;
- електролітичну дію – порушення фізико-хімічного складу крові та інших рідин організму, зміна проникності клітинних мембран;
- механічну дію – розриви тканин, сухожиль, судин унаслідок судомних скорочень м'язів або вибухового перетворення тканин, що різко нагріваються.

За характером ураження розрізняють місцеві електротравми та загальні електричні удари.

До місцевих електротравм належать:

- електричні опіки контактного або дугового походження;
- електричні знаки (невеликі ущільнені або знебарвлені ділянки шкіри в місці входу/виходу струму);
- металізація шкіри дрібними частинками розплавленого металу при електричній дузі;

- електроофтальмія – ураження органів зору ультрафіолетовим випромінюванням електричної дуги;
- механічні ушкодження, пов'язані з різкими судомними рухами (переломи, вивихи, розрив зв'язок).

Загальні електричні удари характеризуються порушенням діяльності життєво важливих органів і систем. Найбільш небезпечними наслідками є:

- фібриляція шлуночків серця з подальшою зупинкою кровообігу;
- параліч дихального центру або судомне припинення дихання;
- гострі порушення мозкового кровообігу, втрата свідомості, коматозні стани.

Для опису наслідків ураження струмом застосовують умовну класифікацію за ступенями тяжкості загального електричного удару:

- I ступінь – судомні скорочення м'язів без втрати свідомості;
- II ступінь – втрата свідомості без виражених порушень дихання та кровообігу;
- III ступінь – втрата свідомості, порушення дихання та серцевої діяльності (аритмія, різке пригнічення скорочень);
- IV ступінь – клінічна смерть, що характеризується відсутністю дихання та пульсу, розширенням зіниць.

Особливо небезпечними є струми промислової частоти 50 Гц у діапазоні 50–100 мА при проходженні через ділянку «рука–рука» або «рука–ноги». У цих умовах найбільш імовірні фібриляція шлуночків та зупинка серця. Постійний струм, як правило, має виражену термічну дію та викликає глибокі опіки, але дещо меншу схильність до фібриляції, хоча при високих значеннях напруги його дія може бути не менш летальною.

Тривалість дії струму має принципове значення: чим довше триває контакт, тим глибшими стають ушкодження, тим вищою є ймовірність необоротних змін у нервово-м'язовій та серцево-судинній системах. Нерідко потерпілий не може самостійно від'єднатися від струмопровідної частини

через судомні скорочення м'язів кисті та передпліччя, що додатково підвищує ризики.

Наслідки ураження струмом не обмежуються гострою фазою. Можливі віддалені ускладнення, зокрема:

- хронічні порушення серцевого ритму, ішемічні зміни міокарда;
- стійкі порушення функцій периферичної та центральної нервової системи (нейропатії, астеничні стани, розлади сну);
- рубцеві деформації тканин після глибоких опіків, обмеження рухливості суглобів;
- психоемоційні розлади, посттравматичні стресові реакції.

На виробництві тяжкість наслідків електротравматизму ускладнюється тим, що ураження часто відбуваються на висоті, біля рухомих частин механізмів, в обмежених просторах чи у вибухонебезпечних зонах. Це може призводити до комбінованих травм, коли до дії електричного струму додаються падіння з висоти, механічні ушкодження, опіки від полум'я.

Таким чином, наслідки ураження електричним струмом охоплюють широкий спектр фізіологічних, функціональних і соціально-економічних втрат. Це зумовлює необхідність комплексної профілактики електротравматизму, суворого дотримання вимог електробезпеки, своєчасного навчання персоналу та організації систематичного інструктажу й контролю за технічним станом електроустановок.

4.4 Дії в аварійних ситуаціях, перша допомога при ураженні електрострумом

Аварійні ситуації, пов'язані з ураженням електричним струмом, належать до категорії особливо небезпечних, оскільки характеризуються раптовістю, високою ймовірністю смертельних наслідків та необхідністю негайного реагування. Ефективність заходів першої допомоги в разі електротравми безпосередньо залежить від швидкості та правильності дій

працівників, які перебувають поруч із потерпілим, а також від рівня їх підготовленості у сфері електробезпеки.

Порядок дій у разі ураження електричним струмом включає декілька послідовних етапів: негайне припинення дії струму на потерпілого, оцінку його стану, виклик екстрених служб та проведення невідкладних реанімаційних заходів до прибуття медичних працівників. Першочерговим завданням є розрив електричного кола між джерелом напруги та потерпілим, що здійснюється шляхом вимкнення рубильника, автомата, відключення штепсельного з'єднання або аварійного вимикача. Забороняється торкатися потерпілого голими руками до повного зняття напруги, оскільки це може призвести до ураження рятувальника.

Якщо відключення напруги технічними засобами неможливе, допускається відтягування потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних засобів (діелектричні рукавички, калоші, гумові килимки) або сухих ізолюючих предметів (дерев'яні палиці, дошки, сухий одяг). При цьому необхідно стояти на ізолюючій поверхні, уникати доторку до металевих конструкцій, трубопроводів та інших заземлених елементів.

Після припинення дії електричного струму необхідно оперативно оцінити стан потерпілого: наявність свідомості, дихання та пульсу на сонній артерії. Якщо потерпілий у свідомості, його слід заспокоїти, забезпечити доступ свіжого повітря, послабити стискуючий одяг, надати травмованій ділянці тіла зручне положення, контролювати стан до прибуття медичного персоналу та заборонити самотійно пересуватись і виконувати фізичні навантаження.

У разі відсутності свідомості, але наявного самотійного дихання та пульсу потерпілого необхідно покласти в стабільне (безпечне) бокове положення для профілактики западання язика та аспірації блювотних мас, постійно контролюючи його стан. При відсутності дихання та пульсу слід негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію. Штучну вентиляцію легенів та непрямий масаж серця виконують згідно з загальноприйнятим

алгоритмом: 30 натискань на грудну клітку з частотою 100–120 натискань за хвилину та 2 рятувальні вдихи (у разі наявності відповідних навичок і засобів захисту). Реанімаційні заходи продовжують до відновлення самостійного дихання і кровообігу, прибуття медичних працівників або фізичного виснаження рятувальника.

Особливу увагу приділяють супутнім ураженням: термічним опікам у місцях входу та виходу струму, травмам внаслідок падіння з висоти, судомним скороченням м'язів. Опікові поверхні не можна відкривати від прилиплого одягу, змащувати мазями чи присипати порошками; на них накладають суху стерильну пов'язку. За наявності переломів або підозри на них кінцівки іммобілізують підручними шинами.

Організаційно-технічні заходи на підприємстві повинні забезпечувати готовність персоналу до дій в аварійних ситуаціях. Для цього на робочих місцях мають бути в наявності аптечки першої допомоги, засоби індивідуального захисту, наочні схеми дій при електротравмі, а також забезпечено періодичне навчання і тренування працівників щодо надання домедичної допомоги. Регламентовані інструкції з охорони праці мають містити чітко визначений порядок дій при ураженні електричним струмом, у тому числі порядок оповіщення відповідальних осіб, виклику екстрених служб та оформлення нещасного випадку.

Дотримання вищенаведених вимог, своєчасне відключення напруги, правильні та узгоджені дії персоналу при наданні першої допомоги у значній мірі підвищують шанси на збереження життя та зменшення тяжкості наслідків електротравм, що є одним із ключових завдань системи охорони праці на підприємстві.

4.5 Розрахунок захисного заземлення

Вихідні дані. Трансформаторна підстанція напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ має глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток трансформатора «стандартна» - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю

складає 27 А. Грунт - чорнозем, другий кліматичний район. Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжин з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

Визначимо норму на опір заземлення R_3^H . Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_3 = U_p / I_3 = 125 / 27 = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно ПУЕ, так як сумарна потужність струмоприймачів більше 100 кВА то R_3 повинен бути не більше 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \Psi = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де $\rho_{\text{табл}}$ – табличне значення, для чорнозему $\rho_{\text{табл}} = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (підвищувальний коефіцієнт $\Psi = 1,2 \dots 1,4$ для стержньових заземлювачів).

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0,366 \cdot (\rho_p / l) \cdot (\lg(2 \cdot l / d) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot t + 1) / (4 \cdot t - 1))) = \\ &= 0,366 \cdot (260 / 5) \cdot (\lg(2 \cdot 5 / 2,5 \cdot 10^{-3}) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot 3 + 5) / (4 \cdot 3 - 5))) = 53,19 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина заземлювача, приймаємо 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаємо стрижні діаметром 2,5 см).

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

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ - 0,5...0,8 м).

Приймаємо, що електроди прокладені по замкнутому контуру і знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_0 = R_b / (R_3^H \cdot \eta_0) = 53,19 / (4 \cdot 0,59) = 22,54 \approx 23 \text{ шт.}$$

Коефіцієнт використання ряду заземлювачів η_0 , для $a/l = 4/5 = 0,8$, $\eta_0 = 0,59$ (де $a = 4$ м – відстань між електродами згідно ПУЕ).

Загальна довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 23 = 96,6 \text{ м.}$$

Опір смуги з урахуванням ефекту екранування:

$$\begin{aligned} R_n &= 0,366 \cdot ((\rho_p) / (l_n \cdot \eta_n)) \cdot \lg((2 \cdot l_n^2) / (b \cdot n)) = \\ &= 0,366 \cdot ((260) / (96,6 \cdot 0,51)) \cdot \lg((2 \cdot 96,6^2) / (0,01 \cdot 23)) = 9,48 \text{ Ом;} \end{aligned}$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм.

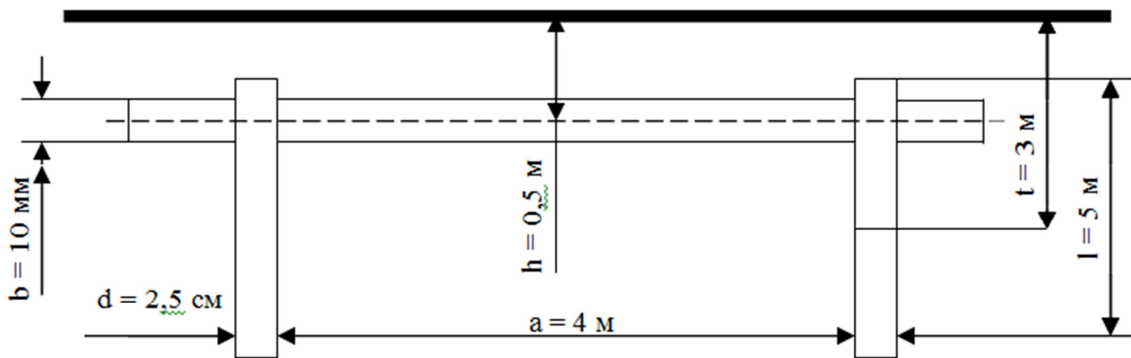


Рис. 4.1. Схема прокладки заземлення.

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{тр} = (R_n \cdot R_3^H) / (R_n - R_3^H) = (9,48 \cdot 4) / (9,48 - 4) = 6,92 \text{ Ом.}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = R_0 / (R_{тр} \cdot \eta_0) = 53,19 / (6,92 \cdot 0,59) = 13,02 \approx 13 \text{ шт.}$$

Виконаємо перевірку опору заземлювача і порівняємо отримане значення з нормою:

$$R_3 = 1 / ((1/R_{тр}) + (1/R_n)) = 1 / ((1/6,92) + (1/9,48)) = 3,74 \text{ Ом.}$$

Таким чином, отримане розрахункове значення заземлювача задовольняє заданій умові.

4.6 Висновки

1. Висвітлено основні принципи забезпечення безпеки при виконанні робіт у електроустановках, що перебувають під напругою.

2. Досліджено ключові фактори виникнення електротравм, до яких належать: недотримання норм законодавчих актів з охорони праці та правил електробезпеки; ігнорування вимог нормативної документації з охорони праці та інструктивних матеріалів; відхилення від встановленої технології виконання робіт.

3. Вплив електричного струму на людський організм класифікується за характером дії на: тепловий, біологічний та електролітичний. Ураження електрострумом може спричинити електротравми з явно вираженими пошкодженнями організму, зокрема: опіки; металізацію шкірного покриву; електричні позначки на шкірі; травми опорно-рухового апарату.

4. Дії працівників у аварійних ситуаціях мають бути детально регламентовані у внутрішніх правилах та інструкціях підприємства і доведені до відома персоналу. Розглянуто послідовність дій при наданні невідкладної медичної допомоги.

5. Виконано розрахунок системи захисного заземлення та визначено його конструктивні параметри.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено комплексне дослідження процесів компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових споживачів, розроблено методичний підхід до визначення оптимального рівня компенсації та виконано прикладні розрахунки для типових графіків навантаження підприємств різних галузей.

1. Реактивна потужність виникає в електричних мережах через індуктивні та ємнісні властивості елементів, що потребують періодичного обміну енергією з джерелом для створення електромагнітних полів, а також через нелінійність та особливості режимів роботи сучасних електроприймачів.

2. Основними споживачами реактивної потужності є індуктивні навантаження – асинхронні двигуни, трансформатори, зварювальні агрегати, печі, ПРА та елементи мережі.

3. Зменшення споживання реактивної потужності досягається шляхом застосування компенсуючих пристроїв, оптимізації роботи електродвигунів, модернізації мереж.

4. Компенсація реактивної потужності є ключовим інструментом підвищення енергоефективності, оскільки дозволяє зменшити струмове навантаження мережі, підвищити коефіцієнт потужності, стабілізувати напругу та знизити втрати.

5. Визначення рівня компенсації реактивної потужності здійснюється на основі багаторівневого підходу, де на верхньому рівні розраховується загальна потужність компенсуючих пристроїв. Він заснований на заданому значенні $\text{tg}\varphi$, за яким розраховується максимальна потужність, що може споживатися з електричної мережі енергопостачальної організації. Решта має бути скомпенсована. Дане значення потребує уточнення та наукового обґрунтування.

6. Плата за споживання реактивної енергії є основним економічним стимулом для споживачів до впровадження системи компенсації реактивної потужності.

7. Запропоновано математичну постановку задачі визначення оптимального рівня компенсації, де мінімізується сума приведених річних витрат на компенсуюче обладнання та плати за споживання реактивної енергії. Визначено структуру цільової функції та параметри, що впливають на економічний результат.

8. Проведені практичні розрахунки оптимального рівня компенсації реактивної потужності для чорної металургії та верстатобудівної промисловості, який показав, що раціональним є застосування глибокої, практично повної компенсації. Для чорної металургії такий висновок обумовлюється специфікою його графіків електричних навантажень, які характеризуються відносною рівномірністю протягом доби, що забезпечує ефективне використання потужності конденсаторних батарей. Додатковими аргументами на користь повної компенсації є висока вартість електричної енергії, що підсилює економічний ефект зниження перетоків реактивної складової, та порівняно низька вартість конденсаторних установок, що робить їх використання особливо економічно доцільним у промислових енергосистемах.

9. Дослідження впливу вартості електричної енергії на глибину компенсації продемонструвало, що навіть істотне зниження тарифу на електроенергію (з 10,32 до 4 грн/кВт·год) не змінює загальної тенденції: оптимальною залишається глибока компенсація, за винятком окремих режимів для навантажень зі значною добовою нерівномірністю, де може бути доцільним залишення невеликої частини реактивної потужності некомпенсованою ($\text{tg}\varphi \approx 0,1$).

10. Аналіз впливу терміну окупності капітальних вкладень показав, що скорочення терміну повернення інвестицій підвищує приведені витрати на обладнання, однак для підприємств із сталими навантаженнями (чорна

металургія) оптимальною залишається повна компенсація реактивної потужності. Для підприємств зі змінними графіками навантаження зона економічної доцільності компенсації розширюється ($\text{tg}\varphi$ від 0 до 0,25), а при коротких термінах окупності (3–4 роки) оптимальний $\text{tg}\varphi$ зміщується до значення близько 0,1.

11. Розроблена методика може бути використана як універсальний інструмент для техніко-економічного обґрунтування систем компенсації у промислових енергетичних комплексах різного типу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки до виконання дипломного і курсового проекту з курсу “Енергетичний менеджмент” для студентів спеціальності “Енергетичний менеджмент” усіх форм навчання. [Електронний ресурс] / Укладачі: Плешков П.Г., Серебренніков С.В., Сіріков О.І., Полтавець М.М., Савеленко І.В. – Кіровоград: КНТУ, 2013 – 168 с. /

2. Енергетичний інжиніринг та менеджмент : в 3-х ч. Ч. 1. Проектування ефективних енергетичних систем / П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, І.В. Савеленко; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П.Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018.– 156 с. /(9,75 др. арк.) Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/8074>

3. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.

4. Електропостачання промислових підприємств: Методичні вказівки до виконання дипломного проекту (електропостачання заводу) для студентів V-VI курсів спеціальності 8.090603 „Електротехнічні системи електроспоживання” усіх форм навчання /Укл.: П.Г.Плешков, А.І.Котиш, А.Ю.Орлович. – Кіровоград: КДТУ, 2004 – 133 с.

5. Конденсаторні установки УКРМ (ККУ) 0,4 кВ. Electrocontrol. URL: <https://electrocontrol.com.ua/ua/elektroshhitovoe-oborudovanie/kondensatornye-ustanovki-aku-04> (дата звернення: 29.11.2025).

6. Электротехнический справочник Т.2. / Под общ.ред.П.Г.Грудинского и др. - изд.5-е, испр. . - М. : Энергия , 1975. - 752 с.

7. Конденсаторні установки УКРМ (ККУ) 0,4 кВ. Electrocontrol. URL: <https://electrocontrol.com.ua/ua/elektroshhitovoe-oborudovanie/kondensatornye-ustanovki-aku-04> (дата звернення: 29.11.2025).

8. Наказ Міністерства енергетики України «Про затвердження Змін до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії» №764 від 30 листопада 2020 року.

9. Вісич А. В., Грома Ю. В. Методичні рекомендації з вибору обладнання для компенсації реактивної потужності у системах електропостачання. Київ : НУЕЕ, 2021. 42 с.

10. Кравченко Ю. М., Шидловський А. К. Ефективність сучасних конденсаторних установок у мережах промислових підприємств. Енергетика та електрифікація. 2021. № 4. С. 28–35.

11. Дяченко О. В., Бутенко І. В. Оцінювання впливу коефіцієнта потужності на втрати електроенергії в мережах 0,4–10 кВ. Відроджена енергетика. 2022. № 1. С. 45–53.

12. Гончарук Я. В. Сучасні підходи до компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових споживачів. Технічні науки та технології. 2020. № 2(20). С. 112–121.

13. Паламарчук В. М. Енергоефективність електроприводів і вплив частотного регулювання на споживання реактивної потужності. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. № 3. С. 67–74.

14. Сасін В. П., Кошлатий В. Т. Аналіз роботи автоматизованих компенсуючих установок у промислових електричних мережах. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2022. № 25(101). С. 89–97.

15. Бондаренко А. С. Оптимізація схем компенсації реактивної потужності в умовах сучасних електричних навантажень. Науковий вісник НЛТУ України. 2023. Т. 33, № 2. С. 154–162.