

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*бакалавр*

на тему: «Проектування енергоефективної системи електропостачання  
промислового цеху»

КРБ.14ЕЕбд\_41.02.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за  
освітньо-професійною програмою  
*«Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка»*  
спеціальності 141  
*«Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка»*  
ступеня вищої освіти *бакалавр*  
групи *141ЕЕбд\_41*  
БИБИК Сергій

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент  
СЕМЕНОВ Анатолій

**Полтава – 2026 року**

## ВСТУП

Електроенергетика є однією з базових складових функціонування сучасного промислового виробництва, оскільки саме від надійності та ефективності систем електропостачання значною мірою залежать безперервність технологічних процесів, якість продукції, рівень безпеки праці та економічні показники роботи підприємства [1, 2]. Особливо важливого значення набуває проектування систем електропостачання промислових цехів, які характеризуються значною концентрацією електроприймачів, нерівномірністю навантаження, наявністю реактивної складової потужності та підвищеними вимогами до надійності електропостачання.

У сучасних умовах розвитку промисловості дедалі більшої актуальності набувають питання енергоефективності. Це пов'язано зі зростанням вартості енергоресурсів, необхідністю зниження експлуатаційних витрат, підвищенням енергетичної безпеки підприємств та впровадженням сучасних технічних рішень у сфері розподілу і споживання електроенергії. Енергоефективна система електропостачання повинна забезпечувати не лише надійне живлення всіх електроприймачів, але й мінімізацію втрат електроенергії, раціональний вибір напруги, кількості та потужності трансформаторів, оптимальне розміщення підстанцій, а також ефективну компенсацію реактивної потужності [1-4].

Під час проектування системи електропостачання промислового цеху особливу увагу необхідно приділяти визначенню електричних навантажень, оскільки саме вони є основою для вибору всіх елементів системи: силових трансформаторів, кабельних і шинних ліній, комутаційної та захисної апаратури, а також засобів компенсації реактивної потужності. Правильне визначення навантажень дозволяє не тільки забезпечити необхідну надійність роботи електрообладнання, але й досягти економічно доцільного рівня капітальних та експлуатаційних витрат.

Важливим напрямом підвищення енергоефективності систем електропостачання промислових об'єктів є компенсація реактивної потужності. Наявність значної реактивної складової призводить до збільшення струмів у

мережі, додаткових втрат електроенергії, зниження пропускної здатності елементів системи та погіршення режимів напруги [1, 2, 4]. Тому застосування сучасних регульованих або нерегульованих конденсаторних установок є необхідною умовою підвищення ефективності функціонування внутрішньоцехових електричних мереж.

Отже, тема бакалаврської роботи, яка присвячена проектуванню енергоефективної системи електропостачання промислового цеху, є актуальною як з науково-технічної, так і з практичної точки зору. Її актуальність зумовлена потребою в розробленні технічно обґрунтованих і економічно доцільних рішень, спрямованих на підвищення надійності електропостачання, зменшення втрат електроенергії та вдосконалення режимів роботи електрообладнання.

**Мета роботи** – розробити проєкт енергоефективної системи електропостачання промислового цеху з обґрунтуванням технічних рішень щодо визначення електричних навантажень, вибору структури внутрішнього електропостачання, трансформаторного обладнання, засобів компенсації реактивної потужності та основного електрообладнання.

**Об'єкт дослідження** – система електропостачання промислового цеху.

**Предмет дослідження** – методи та технічні рішення з проектування енергоефективної системи електропостачання промислового цеху.

**Методи дослідження** – аналіз технічної та нормативної літератури, аналітичні методи визначення електричних навантажень, методи вибору та порівняння варіантів схем електропостачання, а також техніко-економічне обґрунтування проєктних рішень. Структуру цього блоку я адаптував за логікою другого зразка, але змінив предмет і методи під тему цехового електропостачання.

**Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:**

- проаналізувати особливості систем електропостачання промислових цехів та вимоги до їх енергоефективності;
- розглянути основні підходи до визначення електричних навантажень цеху;

- обґрунтувати необхідність і способи компенсації реактивної потужності;
- проаналізувати принципи вибору кількості, потужності та розміщення цехових трансформаторних підстанцій;
- визначити напрямки підвищення енергоефективності та надійності внутрішньоцехової системи електропостачання.

**Практичне значення роботи** полягає в можливості використання запропонованих підходів при проектуванні та модернізації систем електропостачання промислових цехів з метою зниження втрат електроенергії, підвищення надійності електропостачання та покращення техніко-економічних показників роботи підприємства.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ЦЕХУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Загальна характеристика систем електропостачання промислових цехів

Система електропостачання промислового цеху є сукупністю взаємопов'язаних елементів, призначених для приймання, перетворення та розподілу електричної енергії між окремими електроприймачами відповідно до вимог технологічного процесу [1, 2]. До складу такої системи, як правило, входять джерело живлення, трансформаторні підстанції, розподільчі пристрої, кабельні та шинні лінії, комутаційна і захисна апаратура, а також електроспоживачі різних категорій надійності [1, 4, 5]. Ефективність роботи всієї системи визначається правильністю вибору її структури, параметрів окремих елементів і режимів роботи. Цей підхід спирається на опис цехового електропостачання та ролі його елементів у наданому зразку.

Промислові цехи характеризуються значною концентрацією електричних навантажень, різноманітністю електроприймачів та різними режимами їх роботи. У складі навантаження можуть бути електродвигуни насосів, компресорів, вентиляторів, підйомно-транспортних механізмів, допоміжних установок та іншого технологічного обладнання. Саме тому система електропостачання цеху повинна враховувати не лише сумарну встановлену потужність, але й коефіцієнти використання, завантаження, одночасності роботи споживачів, а також їхній вплив на якість електроенергії [6, 7].

До основних вимог, що ставляться до систем електропостачання промислових цехів, належать надійність, економічність, безпечність, зручність експлуатації та можливість подальшого розвитку або модернізації [1, 4]. Надійність електропостачання визначається здатністю системи забезпечувати безперервне живлення електроприймачів відповідно до їх категорії, а економічність – мінімальними витратами на спорудження та експлуатацію за

умови дотримання технічних вимог. Енергоефективність у цьому контексті розглядається як здатність системи забезпечувати технологічно необхідний рівень електропостачання з мінімальними втратами електроенергії та раціональним використанням електротехнічного обладнання.

Особливу роль у проектуванні систем електропостачання цеху відіграє правильний вибір рівня напруги, схеми внутрішньоцехового розподілу електроенергії, типу та потужності трансформаторів, а також місця розташування цехової підстанції [4, 8, 9]. Від цих рішень залежить довжина мережі, втрати напруги, втрати потужності, надійність електропостачання та зручність технічного обслуговування. Економічність системи безпосередньо визначається вибором раціональних значень напруги, перерізів проводів і кабелів, числа та потужності трансформаторних підстанцій і засобів компенсації реактивної потужності.

Таким чином, система електропостачання промислового цеху є складним інженерним об'єктом, для якого важливими є узгодження технічних, економічних та експлуатаційних вимог. Це обумовлює необхідність детального аналізу чинників, що визначають її енергоефективність, а також обґрунтованого підходу до вибору проектних рішень.

## **1.2 Аналіз електричних навантажень як основи проектування цехового електропостачання**

Розрахунок електричних навантажень є одним із найважливіших етапів проектування системи електропостачання промислового цеху. Саме результати такого розрахунку є вихідними даними для вибору кількості та потужності силових трансформаторів, перерізів кабельних і шинних ліній, параметрів захисної апаратури, а також для визначення потреби у компенсації реактивної потужності [2, 3, 10]. Розрахунок навантажень виконується для вибору та перевірки струмоведучих елементів, визначення втрат і коливань напруги та вибору засобів захисту.

Під розрахунковим навантаженням розуміють найбільше значення навантаження елемента системи електропостачання, усереднене за певний

проміжок часу. Для промислових цехів характерною є наявність різних за потужністю і режимом роботи електроприймачів, тому визначення навантаження повинно враховувати не лише встановлену потужність обладнання, а й коефіцієнти використання, завантаження та можливу одночасність увімкнення окремих механізмів. Такий підхід дає змогу уникнути як завищення, так і заниження параметрів елементів системи.

У практиці проєктування внутрішньоцехових мереж розрахунок навантажень доцільно проводити за рівнями системи електропостачання. У зразку виділено декілька рівнів – від окремих ліній, що живлять електроприймачі, до шин цехової підстанції та межі балансової належності підприємства. Такий підхід є важливим, оскільки дозволяє поетапно визначати навантаження на окремих ділянках мережі та забезпечує обґрунтований вибір обладнання для кожного рівня розподілу електроенергії.

Для промислового цеху, в якому працюють насоси, компресори, вентилятори, підйомники, крани та інші електроприймачі, характерною є значна частка електродвигунного навантаження. Такі споживачі, як правило, формують не тільки активну, але й реактивну потужність, що суттєво впливає на режим роботи мережі. Тому під час аналізу електричних навантажень необхідно враховувати значення коефіцієнта потужності та можливість його підвищення шляхом компенсації реактивної складової. Таким чином, після розрахунку навантажень безпосередньо потрібно розглянути питання компенсації реактивної потужності.

Таким чином, визначення електричних навантажень є основою всього подальшого проєктування системи електропостачання цеху. Від точності цього етапу залежить раціональність вибору трансформаторів, конфігурації мережі, захисної апаратури та компенсуючих пристроїв, а відтак і загальний рівень енергоефективності системи.

### **1.3 Компенсація реактивної потужності як засіб підвищення енергоефективності**

Однією з характерних особливостей електропостачання промислових цехів є наявність значної реактивної потужності, яка виникає внаслідок роботи асинхронних електродвигунів, трансформаторів та інших індуктивних споживачів. Наявність реактивної складової призводить до підвищення струмів у мережі, збільшення втрат активної потужності в кабелях, шинах і трансформаторах, а також до погіршення режимів напруги [1, 4, 11]. Саме тому компенсація реактивної потужності є одним із найефективніших способів підвищення енергоефективності системи електропостачання промислового цеху.

Правильний вибір засобів компенсації для мереж промислового підприємства можливий лише за умови дотримання комплексного підходу до проектування [1, 6, 12]. При цьому технічні рішення повинні забезпечувати допустимі режими напруги, допустимі струмові навантаження елементів мережі, необхідні режими роботи джерел реактивної потужності та відповідний резерв реактивної потужності у вузлах мережі. Такий підхід є цілком обґрунтованим з точки зору сучасного енергоефективного проектування.

Для компенсації реактивної потужності в системах електропостачання цехів найчастіше застосовують батареї конденсаторів. Їх можна встановлювати як у нерегульованому, так і в регульованому виконанні. Нерегульовані установки доцільні за відносно сталого навантаження, тоді як регульовані є більш ефективними в умовах змінного графіка споживання, оскільки дозволяють підтримувати необхідний рівень коефіцієнта потужності та зменшувати перетоки реактивної потужності через силові трансформатори. У зразку наведено порівняння саме цих двох варіантів і зроблено висновок про перевагу регульованої конденсаторної установки.

З енергоефективної точки зору компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити повну потужність, яку повинні передавати елементи системи електропостачання, підвищити пропускну здатність мережі, знизити втрати електроенергії та поліпшити показники якості електроенергії. Крім того, це

створює передумови для більш раціонального вибору потужності трансформаторів і дає можливість зменшити експлуатаційні витрати.

Отже, компенсація реактивної потужності є не допоміжним, а одним із ключових елементів енергоефективної системи електропостачання промислового цеху. Її впровадження повинно розглядатися як обов'язкова складова проєктних рішень, спрямованих на зниження втрат електроенергії та підвищення загальної ефективності функціонування електричної мережі.

#### **1.4 Вибір трансформаторної підстанції та структури внутрішнього електропостачання цеху**

Важливим етапом проєктування системи електропостачання промислового цеху є вибір типу трансформаторної підстанції, її потужності, кількості трансформаторів та місця розташування. Трансформаторна підстанція виконує функції приймання, перетворення та розподілу електричної енергії, тому її параметри безпосередньо впливають на надійність та економічність усієї системи [1, 4, 5]. У наданому матеріалі підкреслено, що трансформаторні підстанції можуть бути різного виконання, а вибір конкретного варіанта визначається характером навантаження, вимогами до надійності та особливостями об'єкта.

Для промислових цехів доцільним є застосування комплектних трансформаторних підстанцій, які забезпечують компактність, заводську готовність, зручність монтажу та експлуатації [1, 8]. При значному навантаженні та наявності електроприймачів підвищеної категорії надійності перевагу, як правило, надають двотрансформаторним підстанціям, оскільки вони дозволяють зберегти живлення відповідальних споживачів у разі виходу з ладу одного трансформатора [4, 5, 13]. Саме такий висновок зроблено в наданому зразку, де для живлення цеху рекомендовано двотрансформаторне КТП.

Не менш важливим є питання раціонального розміщення цехової підстанції. У зразку для цього пропонується використовувати картограму навантажень, що дає змогу визначити центр електричних навантажень і, відповідно, зменшити довжину внутрішньоцехових мереж. Такий підхід сприяє

зниженню втрат електроенергії, зменшенню витрат на кабельну продукцію та покращенню режимів напруги у віддалених точках мережі.

Структура внутрішнього електропостачання повинна забезпечувати простоту схеми, зручність обслуговування, достатній рівень селективності захисту та можливість локалізації аварійних режимів. При цьому використання сучасних комплектних розподільчих пристроїв, автоматичних вимикачів та засобів резервування дозволяє підвищити надійність функціонування мережі та скоротити час відновлення електропостачання у разі пошкоджень.

Отже, вибір підстанції та структури внутрішнього електропостачання є одним із ключових етапів формування енергоефективної системи живлення цеху. Раціональні рішення в цій частині проєкту забезпечують підвищення надійності, зниження втрат електроенергії та поліпшення техніко-економічних показників експлуатації.

### **1.5 Обґрунтування напряму дослідження**

Проведений аналіз показує, що проєктування енергоефективної системи електропостачання промислового цеху повинно базуватися на комплексному врахуванні електричних, технічних, економічних та експлуатаційних чинників [3-5, 8]. Недостатньо виконати лише вибір обладнання за встановленою потужністю споживачів; необхідно враховувати характер графіків навантаження, рівень реактивної потужності, категорії надійності електроприймачів, втрати електроенергії в елементах мережі та можливості зниження цих втрат шляхом оптимізації структури системи.

Аналіз матеріалу дозволяє стверджувати, що найбільш суттєвими напрямами підвищення енергоефективності є: точне визначення електричних навантажень; раціональний вибір кількості та потужності трансформаторів; обґрунтоване розміщення цехової підстанції; застосування сучасних комплектних розподільчих пристроїв; впровадження компенсації реактивної потужності; зменшення втрат електроенергії в елементах мережі. Саме ці питання будуть покладені в основу подальших розрахунків і проєктних рішень у бакалаврській роботі.

У зв'язку з цим у подальших розділах роботи основну увагу буде приділено розрахунку електричних навантажень цеху, вибору необхідного трансформаторного обладнання, обґрунтуванню структури внутрішнього електропостачання, вибору компенсуючих пристроїв та оцінюванню техніко-економічної ефективності прийнятих рішень.

## Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні особливості проектування енергоефективної системи електропостачання промислового цеху та обґрунтовано напрям подальшого дослідження. Встановлено, що система електропостачання цеху є складним інженерним комплексом, ефективність якого визначається правильністю вибору структури мережі, параметрів трансформаторної підстанції, розподільчих пристроїв, кабельних ліній і компенсуючих засобів.

Показано, що визначальним етапом проектування є розрахунок електричних навантажень, оскільки саме він створює основу для вибору всіх елементів системи електропостачання. Від точності визначення розрахункових навантажень залежить технічна обґрунтованість і економічність подальших проектних рішень.

Обґрунтовано, що важливим засобом підвищення енергоефективності системи електропостачання є компенсація реактивної потужності, яка дозволяє зменшити втрати електроенергії, поліпшити режим напруги та знизити навантаження на елементи мережі. Аналіз наданого матеріалу свідчить про доцільність застосування регульованих конденсаторних установок за змінного характеру навантаження промислового цеху.

Також встановлено, що раціональний вибір кількості, потужності та місця розташування цехової трансформаторної підстанції є одним із ключових чинників забезпечення надійності та економічності системи електропостачання. Доцільним є використання комплектних двотрансформаторних підстанцій у випадках, коли необхідно забезпечити підвищений рівень надійності живлення відповідальних електроприймачів.

Здійснений аналіз підтвердив актуальність теми бакалаврської роботи та дозволив сформулювати основні напрямки подальших досліджень, які повинні бути спрямовані на вибір технічно обґрунтованої та економічно ефективною системи електропостачання промислового цеху.

## РОЗДІЛ 2 ВИБІР СХЕМИ ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ЦЕХУ

### 2.1 Вибір типу і розміщення цехової підстанції

Трансформаторна підстанція є ключовим елементом системи внутрішнього електропостачання промислового цеху, оскільки саме вона забезпечує приймання електричної енергії від мережі вищої напруги, її перетворення до рівня напруги цехових споживачів та подальший розподіл між окремими навантаженнями. Для промислових об'єктів вибір типу підстанції визначається установленою потужністю електроприймачів, категорією надійності електропостачання, конфігурацією виробничих приміщень, вимогами безпеки та економічною доцільністю [1, 4, 8]. Для цехових систем найчастіше застосовують комплектні трансформаторні підстанції 6(10)/0,4 кВ, які забезпечують компактність, заводську готовність і зручність монтажу та експлуатації.

Для проєктованої системи електропостачання промислового цеху доцільно прийняти комплектну трансформаторну підстанцію внутрішньої або наближеної до цеху установки з напругою 10/0,4 кВ. Такий вибір обумовлений тим, що напруга 0,4 кВ є стандартною для живлення більшості силових і освітлювальних електроприймачів цеху, а застосування комплектної підстанції дозволяє скоротити довжину низьковольтних ліній, зменшити втрати електроенергії та забезпечити зручність оперативного обслуговування [1, 5]. Номінальні стандартні напруги мережі та загальні вимоги до електроустановок визначаються ПУЕ та стандартом ІЕС 60038 [4, 6].

Важливим питанням під час проєктування є вибір місця розташування цехової підстанції. Раціонально розміщувати підстанцію якомога ближче до центру електричних навантажень, оскільки це забезпечує мінімізацію довжини розподільчих мереж 0,4 кВ, зниження втрат напруги та зменшення витрат на кабельну продукцію. Такий підхід відповідає загальноприйнятим принципам проєктування цехових систем електропостачання та підтверджується

використанням картограми навантажень для визначення центру електричних навантажень.

При цьому конкретне місце встановлення підстанції повинно вибиратися з урахуванням будівельних, пожежних і експлуатаційних вимог, а також можливості безпечного доступу для персоналу. Для обґрунтування місця розташування цехової підстанції доцільно використати схему розміщення навантажень у межах виробничого приміщення. Це дає змогу вибрати таке місце встановлення підстанції, яке забезпечує мінімальну довжину внутрішньоцехових мереж і зменшення втрат електроенергії.

Як видно з рисунка 2.1, цехову підстанцію доцільно розташувати поблизу центру електричних навантажень, що забезпечує скорочення довжини кабельних ліній, зменшення втрат напруги та підвищення економічності системи електропостачання [1, 2, 8].

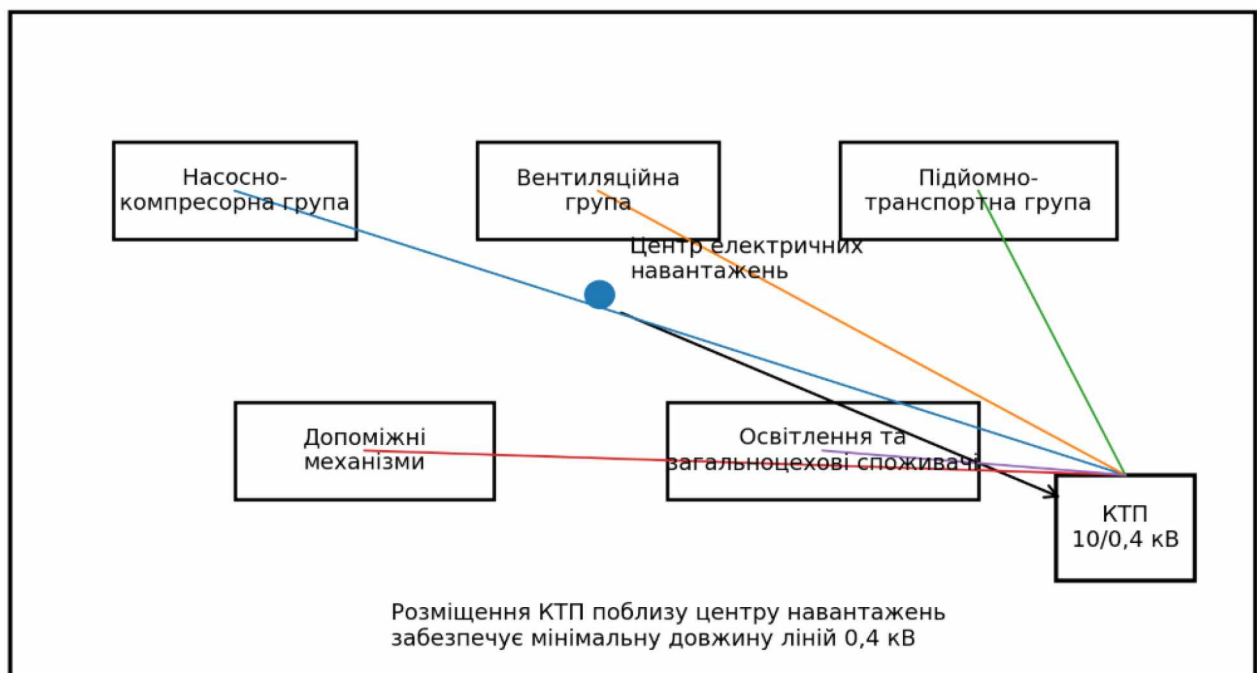


Рисунок 2.1 – Схема розміщення цехової підстанції відносно центру електричних навантажень

Таким чином, для системи електропостачання промислового цеху приймаємо комплектну цехову підстанцію 10/0,4 кВ, розташовану поблизу центру електричних навантажень. Таке рішення забезпечує зниження втрат

електроенергії, скорочення довжини внутрішньоцехових мереж та підвищення надійності електропостачання [1, 4, 8].

Отже, для системи електропостачання промислового цеху доцільно прийняти комплектну цехову підстанцію 10/0,4 кВ, розташовану поблизу центру електричних навантажень. Таке рішення забезпечує зниження втрат електроенергії, скорочення довжини внутрішньоцехових мереж та підвищення надійності електропостачання.

## 2.2 Вибір кількості та потужності трансформаторів

Вибір кількості та потужності трансформаторів виконується за розрахунковим повним навантаженням цеху після компенсації реактивної потужності. Для подальших розрахунків приймаємо такі вихідні дані:

- встановлена потужність електроприймачів цеху:  $P_{вст}=574,2$  кВт;
- розрахункова активна потужність цеху:  $P_p=410$  кВт;
- початковий коефіцієнт потужності:  $\cos\varphi_1=0,82$ ;
- коефіцієнт потужності після компенсації  $\cos\varphi_2=0,95$ .

Прийняті значення є характерними для промислового цеху з переважанням асинхронного двигунного навантаження, до складу якого входять насоси, компресори, вентилятори, підйомно-транспортні механізми та інші силові електроприймачі [1, 2, 8, 10].

Реактивну потужність цеху до компенсації визначаємо за виразом:

$$tg\varphi_1 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1} - 1} = 0.698$$

Тоді

$$Q_1 = P_p \cdot tg\varphi_1 = 286,2 \text{ квар.}$$

Після компенсації при

$$\cos\varphi_2 = 0,95$$

одержимо

$$tg\varphi_2 = 0,329,$$

а отже

$$Q_2 = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 = 134,9 \text{ квар.}$$

Необхідна потужність компенсувальної установки становить:

$$Q_k = Q_1 - Q_2 = 151,3 \text{ квар.}$$

З урахуванням стандартного ряду номінальних потужностей приймаємо автоматично регульовану конденсаторну установку потужністю:  $Q_k = 150$  квар.

Такий підхід до компенсації реактивної потужності дає змогу зменшити навантаження на трансформатори та внутрішньоцехові мережі, знизити втрати електроенергії та покращити режим напруги [1, 2, 9, 10, 11].

Після компенсації повна розрахункова потужність цеху дорівнює:  $S_p = 431,6$  кВА.

Для вибору структури підстанції доцільно порівняти однострансформаторний і двотрансформаторний варіанти.

Як видно з табл. 2.1, двотрансформаторна схема має суттєві переваги за показниками надійності, резервування та експлуатаційної гнучкості. Саме тому для промислового цеху доцільно прийняти двотрансформаторну підстанцію [1, 5, 9, 13].

Орієнтовну потужність одного трансформатора визначаємо за виразом:  $S_{\text{тр}} \geq S_p / 2 = 215,8$  кВА.

За стандартним рядом номінальних потужностей приймаємо два трансформатори по 250 кВА кожний. Коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі становить:  $k_3 = S_p / (2 \cdot 250) = 0,86$ .

Це значення свідчить про достатньо повне, але не перевантажене використання трансформаторів у нормальному режимі роботи [1, 5, 8].

Таблиця 2.1 – Порівняння варіантів виконання цехової підстанції

Показник	Однострансформаторн а КТП	Двотрансформаторн а КТП
----------	------------------------------	-------------------------------

Надійність електропостачання	нижча	вища
Можливість резервування	відсутня	наявна
Гнучкість експлуатації	нижча	вища
Зручність ремонту	нижча	вища
Доцільність для відповідального навантаження	обмежена	висока

У післяаварійному режимі один трансформатор повинен забезпечити живлення відповідальної частини навантаження. Для розрахунку приймаємо, що до відповідального навантаження належить приблизно 55 % від розрахункової повної потужності цеху:

$$S_{\text{відп}}=237,4 \text{ кВА.}$$

Тоді коефіцієнт завантаження в післяаварійному режимі дорівнює:

$$k_{\text{ав}}=0,95.$$

Отже, один трансформатор потужністю 250 кВА здатний забезпечити живлення відповідальних електроприймачів у післяаварійному режимі за умови відключення другорядного навантаження. Це підтверджує правильність вибору двох трансформаторів по 250 кВА [4, 5]. В табл. 2.2. представлено результати вибору силових трансформаторів.

На рис. 2.2 подано однолінійну схему електропостачання цеху, яка передбачає живлення від двох силових трансформаторів через секціоновані шини 0,4 кВ. Така побудова схеми забезпечує підвищену надійність електропостачання, можливість резервування та зручність експлуатації [4, 5, 9].

Таблиця 2.2 – Результати вибору силових трансформаторів

Показник	Значення
Установлена потужність цеху, кВт	574,2
Розрахункова активна потужність, кВт	410
Реактивна потужність до компенсації, квар	286,2
Реактивна потужність після компенсації, квар	134,9
Потужність конденсаторної установки, квар	150
Розрахункова повна потужність, кВА	431,6
Кількість трансформаторів	2
Потужність одного трансформатора, кВА	250
Коефіцієнт завантаження в нормальному режимі	0,86
Коефіцієнт завантаження в післяаварійному режимі	0,95

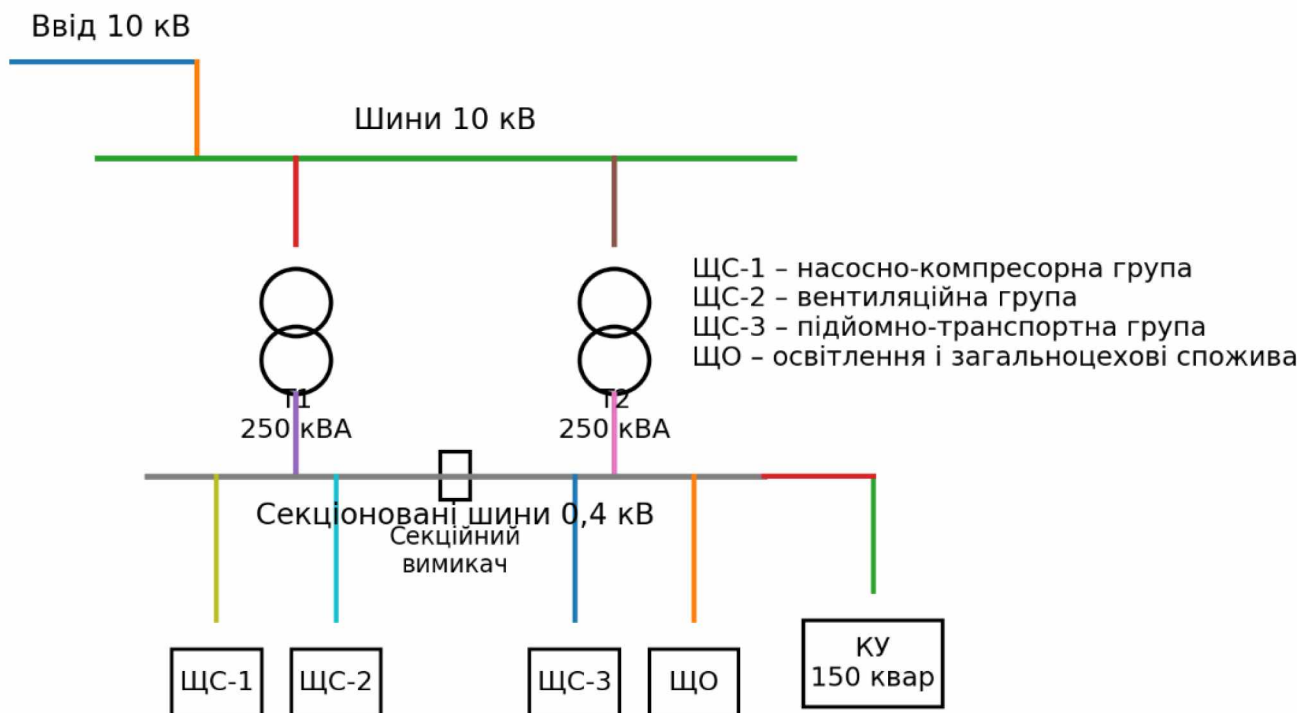


Рисунок 2.2 – Однолінійна схема живлення цеху від двотрансформаторної підстанції 10/0,4 кВ

Таким чином, для електропостачання промислового цеху приймаємо двотрансформаторну комплектну підстанцію 10/0,4 кВ із двома силовими

трансформаторами по 250 кВА та автоматично регульованою конденсаторною установкою потужністю 150 квар. Таке рішення є технічно обґрунтованим, забезпечує необхідну надійність і сприяє зниженню втрат електроенергії [1, 5, 9, 11].

### 2.3 Вибір кількості, типу та розташування розподільчих пристроїв

Для розподілу електроенергії на стороні 0,4 кВ у складі цехової підстанції необхідно передбачити комплектний низьковольтний розподільчий пристрій із секціонованими шинами. Секціонування шин підвищує надійність електропостачання, забезпечує резервування частини навантаження та дозволяє проводити ремонтні роботи без повного відключення всього цеху [4, 14]. З урахуванням просторового розміщення електроприймачів у межах цеху доцільно передбачити наступну структуру розподільчих пристроїв (табл. 2.3):

Таблиця 2.3 – Прийнята структура розподільчих пристроїв 0,4 кВ

Елемент	Кількість	Призначення
ГРЩ-0,4 кВ	1	Приймання і розподіл електроенергії від трансформаторів
Секційний вимикач	1	Резервування та секціонування шин
Силовий щит ЩС-1	1	Живлення насосно-компресорної групи
Силовий щит ЩС-2	1	Живлення вентиляційної та допоміжної групи
Силовий щит ЩС-3	1	Живлення підйомно-транспортних механізмів
Щит загальноцехових споживачів	1	Освітлення, допоміжні кола, власні потреби
Конденсаторна установка	1	Компенсація реактивної потужності

- одне головне розподільче щитове устаткування ГРЩ-0,4 кВ у складі підстанції;
- три групові силові щити для основних технологічних зон;
- один окремий щит для допоміжних і загальноцехових споживачів;
- окреме підключення конденсаторної установки до шин 0,4 кВ.

Таке рішення дозволяє раціонально розподілити навантаження, скоротити довжину відхідних ліній та зменшити втрати напруги [1, 2, 8, 10].

Під час вибору типу розподільчих пристроїв необхідно враховувати номінальну напругу 0,4 кВ, частоту 50 Гц, робочі струми, очікувані струми короткого замикання, необхідність селективного захисту, умови навколишнього середовища та вимоги пожежної безпеки. Для промислового цеху доцільно застосувати металеві комплектні шафи внутрішнього встановлення зі ступенем захисту не нижче IP31 або IP41 залежно від умов приміщення [4, 14].

Як видно з рисунка 2.3, електрична енергія від цехової підстанції надходить до головного розподільчого щита, а далі розподіляється між груповими силовими щитами та окремими споживачами. Це забезпечує раціональну побудову мережі, скорочення довжини відхідних ліній і підвищення зручності експлуатації [1, 2, 10, 14].

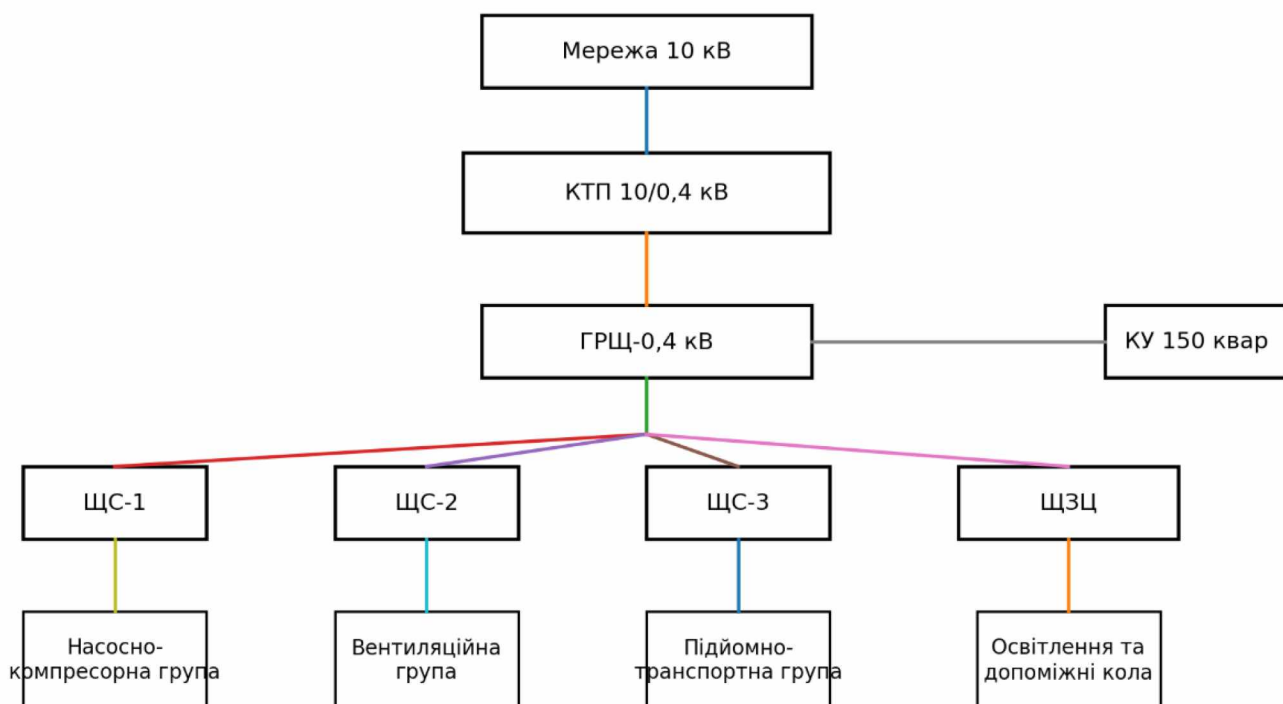


Рисунок 2.3 – Структурна схема розподілу електроенергії в цеху

Розміщення силових щитів слід виконувати максимально близько до центрів відповідних груп навантаження. Це дозволяє зменшити довжину відхідних ліній, покращити умови пуску електродвигунів, знизити втрати потужності та забезпечити зручність експлуатації мережі [1, 2, 10, 11]. На стороні 0,4 кВ приймаємо секціоноване ГРЩ та чотири групові розподільчі щити, що забезпечує гнучку, надійну й економічну структуру розподілу електроенергії в цеху [4, 14].

#### **2.4 Обґрунтування вибору схеми внутрішнього електропостачання цеху**

На підставі виконаного аналізу приймаємо таку схему внутрішнього електропостачання промислового цеху (табл. 2.4): живлення від мережі 10 кВ на комплектну двотрансформаторну підстанцію 10/0,4 кВ; два силові трансформатори по 250 кВА; секціоновані шини 0,4 кВ; автоматично регульована конденсаторна установка потужністю 150 квар; живлення групових щитів і окремих потужних електроприймачів від відповідних відхідних ліній. Така схема відповідає основним принципам побудови цехових мереж і вимогам до надійності та енергоефективності промислових систем електропостачання [1, 4, 5, 8].

Таблиця 2.4 – Прийняті технічні рішення щодо внутрішнього електропостачання цеху

Елемент системи	Прийняте рішення
Тип підстанції	комплектна двотрансформаторна КТП 10/0,4 кВ
Кількість трансформаторів	2
Потужність трансформаторів	2×250 кВА
Тип схеми	двотрансформаторна, із секціонуванням шин

Компенсація реактивної потужності	автоматична КУ 150 квар
Головний розподільчий пристрій	ГРЩ-0,4 кВ, секціоноване
Групові розподільчі щити	4

Перевагами прийнятої схеми є підвищена надійність електропостачання, можливість резервування відповідального навантаження, зниження втрат електроенергії завдяки компенсації реактивної потужності, раціональний розподіл навантаження між секціями шин і скорочення довжини відхідних ліній. Це дозволяє вважати вибрану схему технічно обґрунтованою та економічно доцільною для даного промислового цеху [1, 5, 9, 11].

## Висновки до розділу 2

У другому розділі обґрунтовано вибір схеми внутрішнього електропостачання промислового цеху. Для живлення цеху прийнято комплектну двотрансформаторну підстанцію 10/0,4 кВ, розташовану поблизу центру електричних навантажень. Це дозволяє зменшити довжину мережі 0,4 кВ і знизити втрати електроенергії.

За прийнятих розрахункових даних  $P_p=410$  кВт,  $\cos\varphi_1=0,82$  та  $\cos\varphi_2=0,95$  визначено потребу в компенсації реактивної потужності на рівні 150 квар. Після компенсації повна розрахункова потужність цеху становить 431,6 кВА. Для забезпечення надійної роботи системи прийнято два силові трансформатори по 250 кВА, що працюють із коефіцієнтом завантаження 0,86 у нормальному режимі.

На стороні 0,4 кВ прийнято секціоноване ГРЩ і групові силові щити, що забезпечують раціональний розподіл електроенергії, зручність експлуатації та можливість резервування відповідального навантаження. Отже, вибрана схема внутрішнього електропостачання є технічно обґрунтованою, надійною та енергоефективною.

## РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ОСНОВНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

### 3.1 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ

Після вибору схеми внутрішнього електропостачання, кількості та потужності трансформаторів необхідно виконати розрахунок струмів короткого замикання. Цей розрахунок є обов'язковим, оскільки його результати використовуються для вибору автоматичних вимикачів, комутаційної апаратури, шин, кабелів та перевірки електрообладнання на термічну й динамічну стійкість [1, 4, 5]. У системах електропостачання промислових підприємств струми короткого замикання визначають для найбільш характерних точок мережі, насамперед на шинах низької напруги цехової підстанції та на початку відхідних ліній [2, 8].

Для розрахунку приймаємо, що цех живиться від двох силових трансформаторів потужністю 250 кВА кожний, із номінальною напругою 0,4 кВ, а напруга короткого замикання трансформатора становить 4,5 %. Такі параметри є типовими для трансформаторів даного класу потужності, що застосовуються в комплектних трансформаторних підстанціях 10/0,4 кВ [1, 5].

Номінальний струм одного трансформатора на стороні 0,4 кВ визначаємо за формулою:

$$I_{\text{н}} = \frac{S_{\text{тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{нн}}} = 360,8 \text{ А}$$

Початковий симетричний струм трифазного короткого замикання на шинах 0,4 кВ при живленні від одного трансформатора визначаємо за виразом:  
 $I_{\text{к1}} \approx 8,0 \text{ кА}$ .

Якщо в аварійному або ремонтному режимі секційний вимикач замкнений і обидва трансформатори працюють паралельно на спільні шини, струм короткого замикання на шинах 0,4 кВ становитиме:  $I_{\text{к2}} = 2 \cdot I_{\text{к1}} = 16,0 \text{ кА}$ .

Таким чином, для секціонованого розподільчого пристрою 0,4 кВ слід урахувати два характерні режими: при роботі однієї секції від одного трансформатора  $I_{\text{к}} = 8,0 \text{ кА}$ ; при паралельній роботі двох трансформаторів через

секційний вимикач  $I_k = 16,0$  кА. Для вибору ввідної та секційної апаратури доцільно приймати більше значення, тобто 16,0 кА [1, 4, 14].

Для відхідних ліній струми короткого замикання будуть меншими через вплив опору кабельних ліній. Для попереднього вибору апаратури допускається, що на шинах групових силових щитів струм короткого замикання зменшується до рівня 6–10 кА залежно від довжини та перерізу кабельних ліній [2, 3]. В табл. 3.1. наведено розрахункові струми короткого замикання в характерних точках мережі.

Таблиця 3.1 – Розрахункові струми короткого замикання в характерних точках мережі

Точка короткого замикання	Режим роботи	Розрахунковий струм КЗ, кА
Шини 0,4 кВ однієї секції	Живлення від одного трансформатора	8,0
Шини 0,4 кВ при замкненому секційному вимикачі	Живлення від двох трансформаторів	16,0
Шини групового силового щита	З урахуванням опору лінії	6,0–10,0

Отримані значення є достатніми для подальшого вибору автоматичних вимикачів, шин та кабельних ліній за умовами вимикальної здатності, термічної та електродинамічної стійкості [1, 4, 14].

### 3.2 Вибір автоматичних вимикачів і комутаційно-захисної апаратури

Вибір апаратів захисту й комутації виконується за номінальною напругою, розрахунковим струмом навантаження, вимикальною здатністю, умовами

селективності та експлуатаційними вимогами [4, 14]. Для мережі 0,4 кВ промислового цеху доцільно застосовувати автоматичні вимикачі в литому корпусі або повітряні автоматичні вимикачі на вводах і секційних зв'язках, а також автоматичні вимикачі меншої потужності на відхідних лініях [1, 5].

Струм навантаження секції шин у нормальному режимі визначаємо за формулою:

$$I_p = \frac{S_{\text{сек}}}{\sqrt{3} \cdot U}$$

де  $S_{\text{сек}}$  – розрахункова повна потужність однієї секції.

Оскільки загальна розрахункова потужність цеху після компенсації становить 431,6 кВА, то при рівномірному розподілі навантаження між двома секціями одержимо:  $S_{\text{сек}} = 215,8$  кВА.

Тоді струм однієї секції:  $I_p = 311,5$  А.

З урахуванням резерву приймаємо ввідні автоматичні вимикачі на кожній секції з номінальним струмом 400 А. Вимикальна здатність ввідного автоматичного вимикача повинна бути не меншою від максимального струму короткого замикання на шинах 0,4 кВ. Оскільки найбільший розрахунковий струм короткого замикання становить 16,0 кА, доцільно прийняти вимикачі з граничною вимикальною здатністю не менше 25 кА. Таке рішення забезпечує необхідний запас за умовами вимкнення короткого замикання [4, 14].

Секційний вимикач також доцільно вибрати на номінальний струм 400 А з вимикальною здатністю не менше 25 кА, оскільки в аварійному режимі через нього може передаватися значна частина навантаження однієї секції [1, 5].

Для відхідних ліній до групових щитів орієнтовно приймаємо такі розрахункові навантаження:

ЩС-1 – 180 кВт;

ЩС-2 – 95 кВт;

ЩС-3 – 105 кВт;

ЩЗЦ – 30 кВт.

Для орієнтовного вибору апаратури приймаємо середній коефіцієнт потужності після компенсації 0,95.

Тоді розрахункові струми групових ліній становитимуть:  $I_1 = 273,5$  А;  $I_2 = 144,4$  А;  $I_3 = 159,6$  А;  $I_4 = 45,6$  А.

На підставі цих значень вибираємо номінали автоматичних вимикачів: для ЩС-1 – 315 А; для ЩС-2 – 160 А; для ЩС-3 – 200 А; для ЩЗЦ – 63 А. Вимикальну здатність відхідних автоматів доцільно прийняти не менше 10 кА, що відповідає можливим рівням короткого замикання в мережі після ввідних шин [4, 14].

Таблиця 3.2 – Вибір автоматичних вимикачів

Приєднання	Розрахунковий струм, А	Прийнятий номінальний струм автомата, А	Мінімальна вимикальна здатність, кА
Ввід секції 1	311,5	400	25
Ввід секції 2	311,5	400	25
Секційний вимикач	до 311,5	400	25
ЩС-1	273,5	315	10
ЩС-2	144,4	160	10
ЩС-3	159,6	200	10
ЩЗЦ	45,6	63	6

Отже, вибрана комутаційно-захисна апаратура забезпечує нормальне функціонування мережі, захист від перевантажень і струмів короткого замикання

та відповідає умовам надійної експлуатації системи електропостачання цеху [1, 4, 14].

### 3.3 Вибір кабельних ліній і перевірка провідників

Після вибору захисної апаратури необхідно визначити перерізи кабельних ліній, що живлять групові силові щити та загальноцехові споживачі. Вибір кабелів виконується за умовами допустимого нагрівання, економічної доцільності, механічної міцності, а також за допустимою втратою напруги [1, 5, 8].

Для внутрішньоцехових мереж 0,4 кВ доцільно застосовувати силові кабелі з мідними жилами та ізоляцією з ПВХ або зшитого поліетилену. У бакалаврській роботі приймемо кабелі типу ВВГнг або їх сучасні аналоги, що широко використовуються в стаціонарних внутрішніх електроустановках [4].

Орієнтовний вибір перерізів виконуємо за розрахунковими струмами навантаження. Для мережі цеху приймаємо такі кабельні лінії: ввід від трансформатора до ГРЩ секції — кабель  $4 \times 240 \text{ мм}^2$ ; лінія до ЩС-1 — кабель  $4 \times 150 \text{ мм}^2$ ; лінія до ЩС-2 — кабель  $4 \times 70 \text{ мм}^2$ ; лінія до ЩС-3 — кабель  $4 \times 95 \text{ мм}^2$ ; лінія до ЩЗЦ — кабель  $4 \times 16 \text{ мм}^2$ . Такий вибір відповідає рівню розрахункових струмів і забезпечує необхідний запас за умовою нагрівання [1, 8].

Перевіримо відповідність кабелів за допустимим струмом. Для прикладу, для лінії ЩС-1 при  $I_1 = 273,5 \text{ А}$  вибраний кабель  $4 \times 150 \text{ мм}^2$  має допустимий тривалий струм, що перевищує розрахунковий, а тому умова нагрівання виконується. Для лінії ЩС-2 при  $I_2 = 144,4 \text{ А}$  кабель  $4 \times 70 \text{ мм}^2$  також забезпечує допустиме струмове навантаження. Для лінії ЩС-3 при  $I_3 = 159,6 \text{ А}$  кабель  $4 \times 95 \text{ мм}^2$  має достатній запас. Для лінії ЩЗЦ при  $I_4 = 45,6 \text{ А}$  кабель  $4 \times 16 \text{ мм}^2$  є достатнім за умовами нагрівання та механічної міцності.

Далі виконаємо орієнтовну перевірку втрати напруги для найбільш навантаженої лінії до ЩС-1. Приймаємо довжину лінії 35 м, активний опір кабелю  $4 \times 150 \text{ мм}^2$  буде  $r_0 = 0,125 \text{ Ом/км}$ .

$$R = r_0 \cdot l = 0,00438 \text{ Ом.}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot R = 1,732 \cdot 273,5 \cdot 0,00438 = 2,07 \text{ В.}$$

$$\Delta U\% = (2,07 / 400) \cdot 100 = 0,52 \text{ \%}$$

Отримане значення є допустимим, оскільки для внутрішньоцехових мереж 0,4 кВ втрата напруги на окремій лінії повинна бути невеликою і не призводити до погіршення режиму роботи електроприймачів [1, 4, 8]. В табл. 3.3 наведено вибір кабельних ліній за розрахунковим струмом.

Таблиця 3.3 – Вибір кабельних ліній

Лінія	Розрахунковий струм, А	Прийнятий кабель
Трансформатор – ГРЩ	до 360,8	4×240 мм <sup>2</sup>
ГРЩ – ЩС-1	273,5	4×150 мм <sup>2</sup>
ГРЩ – ЩС-2	144,4	4×70 мм <sup>2</sup>
ГРЩ – ЩС-3	159,6	4×95 мм <sup>2</sup>
ГРЩ – ЩЗЦ	45,6	4×16 мм <sup>2</sup>

Отже, вибрані кабельні лінії забезпечують передачу розрахункового навантаження, допустимий рівень втрати напруги та надійну роботу електромережі цеху [1, 5, 8].

### 3.4 Вибір шин та перевірка розподільчого пристрою 0,4 кВ

Шини розподільчого пристрою 0,4 кВ повинні бути вибрані за номінальним струмом, термічною та електродинамічною стійкістю при короткому замиканні. Номінальний струм секції ГРЩ становить 311,5 А, тому для даного розподільчого пристрою доцільно прийняти мідні або алюмінієві шини, розраховані на струм не менше 400 А [4, 14].

Для цехових розподільчих пристроїв 0,4 кВ широко застосовують збірні шини прямокутного перерізу. У межах даного проєкту можна прийняти, наприклад, мідні шини перерізом 40×5 мм, які забезпечують необхідну струмову пропускну здатність і достатню механічну міцність [1, 5].

Оскільки максимальний струм короткого замикання на шинах 0,4 кВ становить 16 кА, конструкція ГРЩ і шинна система повинні бути вибрані з урахуванням цього значення. Для комплектного низьковольтного розподільчого пристрою доцільно прийняти заводське виконання з номінальним струмом секції 400 А та стійкістю до короткого замикання не нижче 25 кА. Це узгоджується з раніше обраними автоматичними вимикачами [4, 14].

Таким чином, головний розподільчий пристрій 0,4 кВ повинен забезпечувати:

- приймання електроенергії від двох трансформаторів;

- секціонування шин;

- приєднання конденсаторної установки;

- живлення групових силових щитів;

- селективний захист від перевантажень і коротких замикань.

Отже, прийнятий розподільчий пристрій 0,4 кВ відповідає умовам нормальної та аварійної роботи мережі, а його параметри узгоджені з вибраними трансформаторами, автоматичними вимикачами і кабельними лініями [1, 4, 14].

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі виконано розрахунок струмів короткого замикання та обґрунтовано вибір основного електрообладнання системи внутрішнього електропостачання промислового цеху. Встановлено, що максимальний розрахунковий струм трифазного короткого замикання на шинах 0,4 кВ становить 16,0 кА при паралельній роботі двох трансформаторів, а при роботі однієї секції від одного трансформатора – 8,0 кА.

На підставі отриманих значень вибрано ввідні та секційний автоматичні вимикачі на номінальний струм 400 А з вимикальною здатністю 25 кА, а також автоматичні вимикачі для відхідних ліній відповідно до розрахункових струмів групових навантажень.

Виконано вибір кабельних ліній для живлення групових силових щитів і загальноцехових споживачів. Перевірка показала, що вибрані перерізи кабелів забезпечують допустимий нагрів і не перевищують допустимих втрат напруги. Також обґрунтовано параметри шин і головного розподільчого пристрою 0,4 кВ.

Отже, вибране електрообладнання відповідає умовам надійної, безпечної та енергоефективної роботи системи електропостачання промислового цеху.

## РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ЦЕХУ

### 4.1 Вихідні дані для оцінки енергоефективності системи

Оцінка енергоефективності системи електропостачання промислового цеху виконується з метою визначення впливу прийнятих технічних рішень на режим роботи мережі, рівень втрат потужності та електроенергії, завантаження трансформаторів і загальну ефективність електроспоживання. Особливу увагу приділяють впливу компенсації реактивної потужності, оскільки саме вона дозволяє зменшити повну потужність, струми в мережі та втрати в елементах системи [1, 5, 8, 9].

Для розрахунків приймаємо такі вихідні дані (табл. 4.1), отримані в попередніх розділах роботи: установлена потужність електроприймачів цеху  $P_{вст} = 574,2$  кВт; розрахункова активна потужність цеху  $P_p = 410$  кВт; коефіцієнт потужності до компенсації  $\cos\varphi_1 = 0,82$ ; коефіцієнт потужності після компенсації  $\cos\varphi_2 = 0,95$ ; кількість трансформаторів  $n = 2$ ; потужність одного трансформатора  $S_{тр} = 250$  кВА; потужність компенсувальної установки  $Q_k = 150$  квар.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для оцінки енергоефективності системи

Параметр	Позначення	Значення
Установлена потужність цеху	$P_{вст}$	574,2 кВт
Розрахункова активна потужність	$P_p$	410 кВт
Коефіцієнт потужності до компенсації	$\cos\varphi_1$	0,82
Коефіцієнт потужності після компенсації	$\cos\varphi_2$	0,95
Кількість трансформаторів	$N$	2
Потужність одного трансформатора	$S_{тр}$	250 кВА
Потужність КУ	$Q_k$	150 квар

Прийняті дані є характерними для промислового цеху з переважанням асинхронного двигунного навантаження і можуть бути використані для оцінки енергоефективності внутрішньоцехової системи електропостачання [1, 2, 8, 10].

#### **4.2 Вплив компенсації реактивної потужності на режим роботи системи**

Для оцінки ефективності компенсації реактивної потужності визначимо повну потужність і струм навантаження до та після встановлення конденсаторної установки.

До компенсації повна потужність цеху дорівнює:

$$S_1 = P_p / \cos\varphi_1 = 500,0 \text{ кВА.}$$

Після компенсації:

$$S_2 = P_p / \cos\varphi_2 = 431,6 \text{ кВА.}$$

Отже, внаслідок підвищення коефіцієнта потужності повна потужність системи зменшилась на:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = 68,4 \text{ кВА.}$$

Відносне зменшення повної потужності становить:

$$\Delta S\% = 13,68 \text{ \%}.$$

Струм навантаження до компенсації:

$$I_1 = S_1 / (\sqrt{3} \cdot U) = 721,7 \text{ А.}$$

Струм навантаження після компенсації:

$$I_2 = S_2 / (\sqrt{3} \cdot U) = 623,0 \text{ А.}$$

Зменшення струму навантаження:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 98,7 \text{ А.}$$

У відсотках:

$$\Delta I\% = 13,67 \text{ \%}.$$

Отже, встановлення конденсаторної установки забезпечує зменшення повної потужності та струму навантаження приблизно на 13,7 %, що позитивно впливає на режим роботи трансформаторів і мережі в цілому [1, 5, 9, 10].

В табл. 4.2 наведено порівняння режимів роботи системи до і після компенсації.

Таблиця 4.2 – Порівняння режимів роботи системи до і після компенсації

Показник	До компенсації	Після компенсації
Активна потужність, кВт	410,0	410,0
Коефіцієнт потужності	0,82	0,95
Повна потужність, кВА	500,0	431,6
Струм навантаження, А	721,7	623,0

Отримані результати свідчать, що компенсація реактивної потужності створює більш сприятливий режим роботи системи електропостачання, зменшує навантаження на трансформатори та підвищує пропускну здатність мережі [1, 9, 11].

#### 4.3 Оцінка завантаження трансформаторів до і після компенсації

Для характеристики режиму роботи трансформаторів доцільно визначити коефіцієнти їх завантаження до і після компенсації реактивної потужності.

До компенсації при рівномірному розподілі навантаження між двома трансформаторами на кожен з них припадає:

$$S_{1\text{тр}} = S_1 / 2 = 250,0 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт завантаження одного трансформатора:

$$k_{31} = 1,0.$$

Після компенсації на кожен трансформатор припадає:

$$S_{2\text{тр}} = S_2 / 2 = 215,8 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт завантаження після компенсації:

$$k_{32} = 0,86.$$

Таким чином, до компенсації трансформатори працювали практично на номінальному навантаженні, тоді як після компенсації з'явився резерв потужності:

$$S_{рез} = 34,2 \text{ кВА.}$$

Сумарний резерв по двох трансформаторах:

$$S_{рез\Sigma} = 68,4 \text{ кВА.}$$

Отже, компенсація реактивної потужності не лише зменшує струмове навантаження, але й створює додатковий резерв потужності трансформаторів, що підвищує гнучкість експлуатації системи і покращує умови роботи обладнання [1, 5, 8].

В табл. 4.3 наводиться інформація про завантаження трансформаторів до і після компенсації.

Таблиця 4.3 – Завантаження трансформаторів до і після компенсації

Показник	До компенсації	Після компенсації	Одиниця
Повна потужність на один трансформатор	250,0	215,8	кВА
Коефіцієнт завантаження	1,00	0,86	–
Резерв потужності одного трансформатора	0	34,2	кВА

#### 4.4 Розрахунок втрат потужності в трансформаторах

Важливим показником енергоефективності системи є втрати потужності в силових трансформаторах. Для орієнтовного розрахунку приймаємо:

- втрати холостого ходу одного трансформатора  $\Delta P_0 = 0,75 \text{ кВт}$ ;
- втрати короткого замикання одного трансформатора  $\Delta P_k = 3,7 \text{ кВт}$ .

Втрати потужності одного трансформатора визначаються за формулою:

$$\Delta P_{тр} = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot k_3^2.$$

До компенсації

При  $k_{31} = 1,0$  одержимо:  $\Delta P_{тр1} = 4,45 \text{ кВт}$ .

Для двох трансформаторів:  $\Delta P_{\Sigma 1} = 8,90 \text{ кВт}$ .

Після компенсації

При  $k_{32} = 0,86$  одержимо:  $\Delta P_{\text{тр}2} = 3,49$  кВт.

Для двох трансформаторів:  $\Delta P_{\Sigma 2} = 6,98$  кВт.

Зменшення втрат потужності в трансформаторах:  $\Delta P_{\text{ек}} = 1,92$  кВт.

Відносне зниження втрат:  $\Delta P_{\text{ек}}\% = 1,57\%$ .

Отже, завдяки компенсації реактивної потужності втрати потужності в трансформаторах зменшуються приблизно на 21,6 %, що підтверджує енергоефективність прийнятого рішення [9, 10, 11].

Таблиця 4.4 – Втрати потужності в трансформаторах

Показник	До компенсації	Після компенсації	Одиниця
Втрати одного трансформатора	4,45	3,49	кВт
Втрати двох трансформаторів	8,90	6,98	кВт
Зменшення втрат	–	1,92	кВт

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У четвертому розділі виконано оцінку енергоефективності системи електропостачання промислового цеху. Встановлено, що підвищення коефіцієнта потужності з 0,82 до 0,95 забезпечує зменшення повної потужності навантаження з 500,0 до 431,6 кВА та зниження струму навантаження з 721,7 до 623,0 А.

Проведено оцінку завантаження трансформаторів до і після компенсації реактивної потужності. Встановлено, що після встановлення конденсаторної установки коефіцієнт завантаження кожного трансформатора зменшується з 1,0 до 0,86, а резерв потужності одного трансформатора становить 34,2 кВА.

Виконано орієнтовний розрахунок втрат потужності в трансформаторах і кабельних лініях. Встановлено, що їх сумарні втрати зменшуються з 8,90 до 6,98 кВт, тобто на 1,92 кВт, або на 21,6 %. Основна частка втрат припадає на силові трансформатори, що підтверджує важливість компенсації реактивної потужності та раціонального вибору режимів роботи обладнання.

Отже, проведені розрахунки підтверджують технічну придатність та енергоефективність прийнятої системи електропостачання промислового цеху й можуть бути використані як основа для подальшого обґрунтування питань безпеки експлуатації та охорони праці.

## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ, БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ЕФЕКТ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 5.1 Загальна характеристика умов праці під час експлуатації системи електропостачання цеху

Під час експлуатації системи електропостачання промислового цеху на обслуговуючий персонал можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з дією електричного струму, електричної дуги, підвищеної температури струмоведучих частин, можливістю виникнення коротких замикань, пожежі, а також з несприятливими умовами мікроклімату в місцях розташування силового обладнання [15, 16]. Вимоги щодо забезпечення безпечних і здорових умов праці, організації навчання, інструктажів, перевірки знань та відповідальності роботодавця встановлюються Законом України «Про охорону праці» [15].

До основних небезпечних факторів, характерних для системи електропостачання промислового цеху, належать:

- ураження електричним струмом у разі прямого або непрямого дотику;
- поява напруги на металевих неструмоведучих частинах обладнання внаслідок пошкодження ізоляції;
- виникнення термічного впливу електричної дуги;
- пожежа, спричинена коротким замиканням, перевантаженням або нагріванням контактних з'єднань;
- небезпека травмування під час виконання оперативних перемикачів і ремонтних робіт [16, 17, 18].

Особливої уваги з точки зору охорони праці потребують приміщення цехової підстанції, головного розподільчого щита, групових силових щитів та місця встановлення конденсаторної установки. Саме в цих вузлах зосереджуються найбільші струми, комутаційні процеси та підвищена ймовірність аварійних режимів [4, 16].

## 5.2 Заходи електробезпеки в системі електропостачання цеху

Електробезпека є одним із найважливіших напрямів охорони праці під час експлуатації електроустановок промислового цеху. Згідно з Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів, обслуговування електроустановок повинно виконуватися підготовленим персоналом, який пройшов навчання, інструктаж, перевірку знань і має відповідну групу з електробезпеки [16].

Для забезпечення електробезпеки в проєктованій системі електропостачання необхідно передбачити такі технічні заходи:

- використання основної ізоляції струмоведучих частин;
- огороження та недоступність струмоведучих частин для випадкового дотику;
- захисне заземлення металевих неструмоведучих частин електрообладнання;
- автоматичне відключення пошкодженої ділянки мережі;
- застосування попереджувальних плакатів і знаків безпеки;
- використання електрозахисних засобів під час оперативних і ремонтних робіт [4, 16, 19, 20].

У проєктованій системі електропостачання на стороні 0,4 кВ передбачено секціоноване ГРЩ, автоматичні вимикачі на вводах і відхідних лініях, а також захисне заземлення електрообладнання. Обрані в попередніх розділах автоматичні вимикачі забезпечують своєчасне автоматичне вимкнення пошкоджених ділянок мережі, що є одним з основних способів захисту людей і обладнання від наслідків аварійних режимів [4, 14, 16].

Для безпечної експлуатації щитів і підстанції необхідно передбачити:

- замикання дверей електрощитових приміщень;
- чітке маркування приєднань і апаратури;
- наявність діелектричних килимків;
- комплект справних електрозахисних засобів;
- належне освітлення робочої зони;
- безпечний доступ для обслуговування обладнання [16].

### 5.3 Розрахунок захисного заземлення

Одним із головних технічних заходів захисту від ураження електричним струмом є захисне заземлення металевих неструмоведучих частин електрообладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції. Захисне заземлення забезпечує зменшення напруги дотику та створює умови для надійного спрацювання апаратів захисту [4, 16].

Для цехової підстанції виконаємо орієнтовний розрахунок заземлювального пристрою. Приймаємо: питомий опір ґрунту  $\rho=100$  Ом·м; довжина вертикального електрода  $l=3$  м; діаметр електрода  $d=0,016$  м.

Опір одного вертикального електрода визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right)$$

Підставляємо значення і отримуємо, що  $R_1 = 9,84$  Ом.

Приймаємо, що контур заземлення складається з чотирьох вертикальних електродів. З урахуванням коефіцієнта використання  $\eta=0,6$  еквівалентний опір заземлювального пристрою становитиме:

$$R_3 = \frac{R_1}{n \cdot \eta}$$

Підставляємо значення і отримуємо, що  $R_3 = 12,43$  Ом.

Отримане значення свідчить, що для подальшого зменшення опору заземлення доцільно передбачити використання не лише вертикальних електродів, а й горизонтальної сталеві смуги, а також об'єднання штучного і природного заземлення [4, 16]. Остаточні параметри заземлювального пристрою повинні уточнюватися за результатами вимірювання питомого опору ґрунту та відповідно до вимог ПУЕ, правил будови електроустановок і вимог щодо захисту від ураження електричним струмом [4, 16, 19, 20].

Таким чином, захисне заземлення є обов'язковим елементом системи електропостачання цеху і повинно забезпечувати безпечні умови експлуатації електрообладнання.

#### **5.4 Пожежна безпека системи електропостачання**

Електроустановки промислового цеху належать до потенційно пожежонебезпечних об'єктів, оскільки джерелами займання можуть бути короткі замикання, перевантаження кабельних ліній, нагрівання контактних з'єднань, іскріння апаратури, несправність конденсаторної установки або порушення правил проведення ремонтних робіт [17, 18].

Правила пожежної безпеки в Україні вимагають, щоб електрообладнання експлуатувалося в справному стані, а кабелі, апарати захисту й розподільчі пристрої відповідали розрахунковим струмам навантаження та умовам експлуатації [17]. Для енергетичних об'єктів додатково застосовуються галузеві правила пожежної безпеки [18].

Для проєктованої системи електропостачання необхідно передбачити:

- правильний вибір апаратів захисту від коротких замикань і перевантажень;
- періодичний контроль контактних з'єднань;
- недопущення накопичення горючих матеріалів поблизу щитів і підстанції;
- наявність первинних засобів пожежогасіння;
- вільний доступ до електрощитових приміщень;
- дотримання протипожежного режиму під час експлуатації обладнання [17, 18].

У приміщеннях ГРЩ і КТП доцільно встановити порошкові або вуглекислотні вогнегасники, а також розмістити таблички із зазначенням порядку дій у разі пожежі. Використання відкритого вогню, зберігання легкозаймистих матеріалів та проведення вогневих робіт без спеціального дозволу в таких приміщеннях не допускається [17].

Окрему увагу слід приділяти кабельним трасам і місцям проходу кабелів через будівельні конструкції. Кабельні проходки повинні бути ущільнені негорючими матеріалами, а прокладання кабелів — виконане з урахуванням вимог пожежної безпеки [17, 18, 21].

### **5.5 Організаційні заходи з охорони праці**

Безпечна експлуатація системи електропостачання промислового цеху неможлива без належної організації охорони праці. Відповідно до законодавства, роботодавець зобов'язаний забезпечити:

- навчання та перевірку знань працівників;
- проведення інструктажів з охорони праці;
- забезпечення працівників засобами індивідуального захисту;
- контроль за дотриманням вимог безпеки;
- організацію безпечного виконання робіт в електроустановках [15, 16].

Для персоналу, який обслуговує цехову підстанцію та електроустановки 0,4 кВ, необхідно передбачити:

- вступний, первинний, повторний і позаплановий інструктажі;
- присвоєння відповідної групи з електробезпеки;
- забезпечення діелектричними рукавичками, покажчиками напруги, інструментом з ізольованими ручками;
- оформлення наряду-допуску або розпорядження на виконання робіт;
- ознайомлення з діями в разі аварії, пожежі або ураження електричним струмом [16].

Усі розподільчі щити, комутаційні апарати, кабельні лінії та шини повинні мати чітке маркування. На дверях електрощитових приміщень мають бути встановлені попереджувальні знаки безпеки. Такі організаційні заходи сприяють зниженню ризику нещасних випадків і забезпечують безпечну експлуатацію системи електропостачання цеху [15, 16, 17].

## 5.6 Оцінка річного енергетичного ефекту

Для оцінки енергетичного ефекту від зниження втрат потужності в трансформаторах визначимо річну економію електроенергії. Для промислового цеху приймаємо еквівалентний час роботи під навантаженням:  $T=4000$  год/рік. Річна економія електроенергії становитиме:

$$\Delta W = \Delta P_{\text{ек}} \cdot T$$

Отримаємо:  $\Delta W = 1,92 \cdot 4000 = 7680$  кВт/год.

Таким чином, лише за рахунок зменшення втрат у трансформаторах річний енергетичний ефект становить:  $\Delta W = 7680$  кВт/год.

Крім безпосереднього зниження втрат електроенергії, компенсація реактивної потужності забезпечує також додаткові переваги:

- зменшення струмового навантаження на елементи мережі;
- підвищення пропускної здатності трансформаторів;
- покращення режиму напруги;
- створення резерву потужності для можливого підключення нових електроприймачів;
- зниження теплового навантаження на обладнання.

Отже, встановлення автоматично регульованої конденсаторної установки потужністю 150 квар є технічно та енергетично доцільним рішенням для системи електропостачання промислового цеху [1, 9, 10, 11].

Таблиця 4.5 – Енергетичний ефект від компенсації реактивної потужності

Показник	Значення
Зменшення повної потужності	68,4 кВА
Зменшення струму навантаження	98,7 А
Зменшення втрат потужності в трансформаторах	1,92 кВт
Річна економія електроенергії	7680 кВт·год

У п'ятому розділі розглянуто основні питання охорони праці та безпеки експлуатації системи електропостачання промислового цеху. Встановлено, що головними небезпечними факторами є ураження електричним струмом, поява напруги на металевих частинах обладнання, можливість виникнення коротких замикань і пожеж, а також ризики під час виконання оперативних та ремонтних робіт.

Для забезпечення безпечної експлуатації електроустановок передбачено комплекс технічних заходів, зокрема захисне заземлення, автоматичне вимкнення пошкоджених ділянок мережі, застосування електрозахисних засобів, попереджувального маркування та захисних огорожень. Виконано орієнтовний розрахунок захисного заземлення, який підтвердив необхідність застосування контурного заземлювального пристрою.

Окрему увагу приділено пожежній безпеці системи електропостачання. Передбачено використання апаратів захисту від коротких замикань і перевантажень, контроль технічного стану обладнання, наявність первинних засобів пожежогасіння та дотримання протипожежного режиму.

Отже, запропоновані в розділі технічні та організаційні заходи забезпечують безпечні умови праці та підвищують надійність експлуатації системи електропостачання промислового цеху.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне інженерне завдання, що полягає у проєктуванні енергоефективної системи електропостачання промислового цеху з урахуванням вимог надійності, економічності, безпеки експлуатації та можливості подальшого розвитку системи.

У процесі виконання роботи проаналізовано особливості побудови систем електропостачання промислових цехів та встановлено, що ефективність їх функціонування значною мірою визначається правильністю вибору схеми електропостачання, параметрів трансформаторної підстанції, структури внутрішньоцехової мережі, засобів компенсації реактивної потужності та комутаційно-захисного обладнання.

У роботі обґрунтовано доцільність застосування комплектної цехової трансформаторної підстанції напругою 10/0,4 кВ, розташованої поблизу центру електричних навантажень. Таке рішення дозволяє скоротити довжину внутрішньоцехових мереж, знизити втрати напруги та електроенергії, а також підвищити надійність електропостачання споживачів.

На підставі прийнятих вихідних даних виконано розрахунок навантажень системи електропостачання. Встановлено, що за розрахункової активної потужності цеху 410 кВт і підвищенні коефіцієнта потужності з 0,82 до 0,95 повна потужність навантаження зменшується з 500,0 до 431,6 кВА. Для компенсації реактивної потужності обґрунтовано застосування автоматично регульованої конденсаторної установки потужністю 150 квар.

У результаті технічного порівняння варіантів прийнято двотрансформаторну схему електропостачання з двома силовими трансформаторами по 250 кВА кожний. Встановлено, що у нормальному режимі коефіцієнт завантаження трансформаторів становить 0,86, а в післяаварійному режимі один трансформатор може забезпечити живлення відповідальної частини навантаження. Це підтверджує правильність вибору потужності трансформаторного обладнання.

У роботі виконано розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ. Встановлено, що максимальний струм трифазного короткого замикання на шинах 0,4 кВ при паралельній роботі двох трансформаторів становить 16,0 кА. На основі отриманих результатів вибрано ввідні, секційний і відхідні автоматичні вимикачі, які забезпечують необхідну вимикальну здатність, селективність захисту та надійну роботу системи.

Виконано вибір кабельних ліній для живлення групових силових щитів та загальноцехових споживачів. Перевірка показала, що прийняті перерізи кабелів забезпечують допустимий нагрів, допустимі втрати напруги та надійну роботу мережі. Для найбільш навантаженої лінії відносна втрата напруги становить 0,52 %, що підтверджує правильність прийнятого технічного рішення.

Оцінка енергоефективності системи показала, що компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити струм навантаження на 98,7 А, знизити втрати потужності в трансформаторах на 1,92 кВт, або на 21,6 %, та забезпечити річну економію електроенергії на рівні 7680 кВт·год. Це підтверджує енергетичну доцільність упровадження компенсуючої установки в системі електропостачання цеху.

У роботі також розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації системи електропостачання. Запропоновано комплекс технічних і організаційних заходів щодо захисту персоналу від ураження електричним струмом, забезпечення пожежної безпеки, застосування захисного заземлення, електрозахисних засобів і безпечної організації робіт в електроустановках.