

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Гамаги Сергія Юрійовича

Прізвище, ім'я, по батькові студента(ки)

На здобуття першого (бакалаврського) ступеня вищої освіти

Розробка системи електропостачання та компенсації реактивної потужності

Назва теми

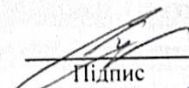
зернового елеватора

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електропобутова техніка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу група ЕТз 21-1

Шифр

  
Підпис

Сергій ГАМАГА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кандидат технічних наук, доцент

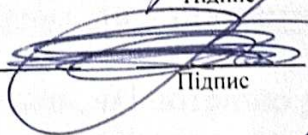
Науковий ступінь, вчене звання

  
Підпис

Світлана СМУТКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер \_\_\_\_\_

Посада

  
Підпис

О.Тимошук  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри МАЕЕС

Назва

  
Підпис

Віталій НЕЙМАК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

2.06.2025

Дата

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри к.т.н., доцент  
НЕЙМАК Віталій Станіславович

2 . 06 . 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гамазі Сергію Юрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання та компенсації реактивної потужності зернового елеватора

Керівник роботи Смутко Світлана Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент  
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 4 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи Для виконання кваліфікаційної роботи передбачено використання довідкових матеріалів з енергопостачання промислових об'єктів, нормативної та технічної документації щодо якості електроенергії, вимог до проектування систем електропостачання, а також типових схем і характеристик обладнання зернових елеваторів. Вихідною інформацією також слугують навчальні посібники, методичні вказівки та статистичні дані щодо електроспоживання в аграрному секторі.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технологічного процесу зернового елеватора – визначення основних електроспоживачів та їх характеристик. 2. Розрахунок електричних навантажень – визначення активної та реактивної потужності елеватора. 3. Оцінка впливу реактивної потужності – аналіз її наслідків для роботи електромережі та економічних витрат підприємства. 4. Розгляд методів компенсації реактивної потужності – порівняння існуючих технічних рішень для покращення енергетичних показників. 5. Розробка системи компенсації реактивної потужності – вибір оптимального обладнання та його параметрів для підвищення коефіцієнта потужності. 6. Формування практичних рекомендацій – пропозиції щодо оптимізації електропостачання зернового елеватора з метою підвищення енергоефективності та зниження витрат.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)  
 1. Генеральний план зерносховища смт. Вапнярка Вінницької області. Док  
 ілюстраційний. 2. Внутрішні мережі 0,4 кВ. Схема електрична принцип  
 аркуша ф.А1). 3. Установка компенсації реактивної потужності.   
 електрична принципова. 4. Установка компенсації реактивної потужності.   
 електрична підключень.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завда прий

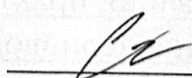
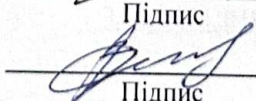
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примі
Збір та аналіз літературних джерел, нормативної бази		
Вивчення технологічного процесу роботи елеватора	Березень 2025 р.	
Аналіз споживачів електроенергії та побудова електротехнічної моделі	Березень 2025 р.	
Розрахунок електричних навантажень елеватора	Квітень 2025	
Оцінка рівня та впливу реактивної потужності	Квітень 2025	
Вибір і техніко-економічне обґрунтування методу компенсації	Квітень 2025	
Розробка схем і рекомендацій щодо модернізації системи	Травень 2025	
Оформлення та літературне редагування тексту роботи	Квітень – червень 2025	
Перевірка, рецензування, підготовка до захисту	Червень 2025	

Студент(ка)

Керівник роботи

  
 Підпис  
  
 Підпис

Сергій ГАМАГА  
 Ім'я, ПРИЗВИЩЕ  
Світлана СМУТКО  
 Ім'я, ПРИЗВИЩЕ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електропобутова техніка

## АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гамага Сергій Юрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

Тема роботи Розробка системи електропостачання та компенсації реактивної потужності зернового елеватора

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента \_\_\_\_\_

2. Обсяг кваліфікаційної роботи: креслень 5 арк, сторінок записки 59

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

Розділ 1. Розглядаються загальні принципи електропостачання зернового елеватора, аналізується його технологічний процес, основні електроспоживачі, а також нормативні вимоги до електропостачальних систем.

Розділ 2. Проводиться аналіз реактивної потужності, розглядаються методи її компенсації, подається порівняння технічних рішень щодо зменшення енергетичних втрат та підвищення коефіцієнта потужності.

Розділ 3. Здійснюється практичний розрахунок електричних навантажень конкретного елеватора, визначається вплив реактивної потужності на систему, пропонується система компенсації та формуються практичні рекомендації щодо енергоефективності.

Підпис студента \_\_\_\_\_

" 2 " 06 20 25 р.

### Р І Ш Е Н Н Я Е К ЗА М Е Н А Ц І Й Н О Ї К О М І С І І:

Протокол 6 від 26 06 20 25 р.

Оцінка роботи ЕК 4,5/В

Рекомендації ЕК виробдження у виробництво

Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар \_\_\_\_\_

Підпис

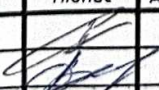

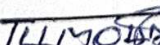

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 26 " 06 20 25 р.

## Зміст

	стор.
Вступ.....	5
1 Загальні принципи електропостачання зернового елеватора .....	7
1.1 Характеристика технологічного процесу елеватора .....	7
1.2 Основні електроспоживачі та їх навантаження.....	8
1.3 Нормативні вимоги до систем електропостачання та електроживлення пристроїв підприємств зберігання зернових культур	10
1.4 Висновки до розділу.....	13
2 Аналіз питання реактивної потужності.....	14
2.1 Реактивна потужність та коефіцієнт потужності .....	14
2.2 Методи застосування компенсуючих пристроїв.....	21
2.3 Порівняння і аналіз пристроїв компенсації реактивної потужності в електричних мережах.....	26
2.4 Висновки до розділу.....	28
3 Аналіз і компенсація реактивної потужності в системі електропостачання елеватора.....	29
3.1 Аналіз технологічного процесу зернового елеватора.....	29
3.2 Розрахунок електричних навантажень елеватора.....	30
3.3 Оцінка впливу реактивної потужності.....	35
3.4 Розгляд методів компенсації реактивної потужності.....	37
3.5 Розробка системи компенсації реактивної потужності .....	40
3.6 Формування практичних рекомендацій.....	47
3.7 Висновки до розділу.....	51
Висновки.....	53
Перелік джерел посилання.....	56

**БРМА 25.00.00.000 ПЗ**

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ганага С. Ю.			Розробка системи електропостачання та компенсації реактивної потужності зернового елеватора Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Смцтво С.В.					4	59
Реценз.						<b>ХНУ. ЕТЗ-21-1</b>		
Н. Контр.								
Затверд.		Неймак В.С.						

## ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасних умовах ефективне електропостачання зернових елеваторів є важливим фактором забезпечення стабільної роботи підприємств аграрного сектору. Зернові елеватори споживають значні обсяги електроенергії для роботи транспортного обладнання, вентиляційних систем, сушарок та інших механізмів, що обумовлює високі вимоги до надійності та енергоефективності їх електропостачальних систем.

Однією з ключових проблем у роботі таких підприємств є наявність значної частки реактивної потужності, що негативно впливає на якість електроенергії, збільшує навантаження на мережу та спричиняє додаткові фінансові витрати. Впровадження ефективних методів компенсації реактивної потужності дозволяє зменшити споживання електроенергії, підвищити коефіцієнт потужності та знизити витрати на оплату електроенергії.

З урахуванням сучасних тенденцій у сфері енергозбереження та підвищення енергоефективності, дослідження питань електропостачання та компенсації реактивної потужності для зернових елеваторів є актуальним як з технічної, так і з економічної точки зору.

Ця тема є особливо важливою у контексті модернізації аграрного сектору та впровадження енергозберігаючих технологій, що сприятиме зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню конкурентоспроможності підприємств.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дипломної роботи є розробка ефективної системи електропостачання зернового елеватора з урахуванням компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільної роботи електрообладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз технологічного процесу зернового елеватора – визначення основних електроспоживачів та їх характеристик.

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Розрахунок електричних навантажень – визначення активної та реактивної потужності елеватора.

3. Оцінка впливу реактивної потужності – аналіз її наслідків для роботи електромережі та економічних витрат підприємства.

4. Розгляд методів компенсації реактивної потужності – порівняння існуючих технічних рішень для покращення енергетичних показників.

5. Розробка системи компенсації реактивної потужності – вибір оптимального обладнання та його параметрів для підвищення коефіцієнта потужності.

6. Формування практичних рекомендацій – пропозиції щодо оптимізації електропостачання зернового елеватора з метою підвищення енергоефективності та зниження витрат.

Ці завдання спрямовані на вирішення проблеми нераціонального використання електроенергії на зернових елеваторах та впровадження сучасних технологій для оптимізації електропостачання.

						Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЕРНОВОГО ЕЛЕВАТОРА

## 1.1. Характеристика технологічного процесу елеватора

Елеватор для зберігання зерна є одним із головних елементів інфраструктури у агробізнесі, який забезпечує ефективне зберігання, обробку та транспортування зернових культур. Розуміння процесу роботи елеватора допомагає оптимізувати виробничі процеси та забезпечити якість зерна [1].

Першим етапом роботи елеватора є приймання зерна. Зерно постачається на елеватор автомобільним, залізничним або водним транспортом. Після прибуття зерно спочатку потрапляє в завальну яму після чого проходить через систему прийомних бункерів та сепарацію, де відбувається попередня очистка від великих домішок, таких як каміння, металеві предмети та інші сторонні матеріали.

Після попередньої очистки зерно надходить на сепаратори та зерноочисні машини, де відбувається більш детальна очистка. Ці машини видаляють дрібні домішки, такі як пил, погані зерна та інші забруднення. Очищене зерно готове до подальшої обробки та зберігання. Якщо зерно має рівень засміченості в межах базової (до 2%) то ця операція може не виконуватися.

Сушка є одним із процесів обробки зерна. Вона обов'язкова у випадку, якщо зерно має вологість, що перевищує базову. Наприклад, для більшості зернових вона складає 14%. Вологість зерна повинна бути оптимальною для зберігання, щоб запобігти псуванню та розвитку грибків. Сушка зерна здійснюється в сушарках різного типу, де зерно проходить через потік гарячого повітря. Температура та час сушки регулюються залежно від типу зерна та його початкової вологості. Є одним із найбільш відповідальних процесів на елеваторі і потребує високої кваліфікації виконавців.

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після сушки зерно транспортується до силосів або зерносховищ, де воно зберігається до подальшого використання. Силоси можуть бути вертикальними або горизонтальними, залежно від обсягу зерна та технологічних вимог. Важливою умовою зберігання є підтримка оптимальних температурних та вологісних умов, а також регулярний контроль стану зерна.

Для транспортування зерна всередині елеватора використовуються різні механізми, такі як конвеєри, норії та пневмотранспортери. Ці механізми забезпечують ефективне переміщення зерна між різними етапами обробки та зберігання.

На всіх етапах обробки та зберігання зерна проводиться регулярний контроль якості. Лабораторні аналізи дозволяють визначити вологість, чистоту, вміст білка та інші важливі параметри зерна. Це допомагає забезпечити високу якість продукції та відповідати вимогам ринку.

Сучасні зернові елеватори оснащені системами автоматизації та управління, які дозволяють оптимізувати процеси обробки та зберігання зерна. Ці системи включають сенсори, контролери та програмне забезпечення для управління машинами і обліку зерна, які забезпечують моніторинг та керування всіма етапами роботи елеватора.

Елеватор для зберігання зерна є складною та багатофункціональною системою, яка забезпечує ефективне зберігання, обробку та транспортування зернових культур. Розуміння процесу роботи елеватора допомагає оптимізувати виробничі процеси, забезпечити високу якість зерна та відповідати вимогам ринку. Сучасні технології та системи автоматизації роблять елеватори ще більш ефективними та надійними, забезпечуючи стабільне постачання зерна на ринок.

## 1.2. Основні електроспоживачі та їх навантаження

Електротехнічна складова частина зерносховища включає в себе [2]:

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- а) електропостачання;
- б) силове електрообладнання;
- в) штучне освітлення;
- г) заземлення та захист від статичної електрики;
- д) захист від блискавки;
- е) світлове огороження;
- ж) дистанційне автоматизоване управління та автоблокування електродвигунів;
- з) виробничу та аварійну світлову та звукову сигналізацію;
- и) дистанційне вимірювання температури зерна.

Основні електроспоживачі зернового елеватора поділяються за функціональним призначенням на технологічні, допоміжні та адміністративно-побутові. До технологічних електроспоживачів належать: транспортери, норії, очисні машини, зерносушарки, вентилятори активного вентилявання, зернонавантажувальні механізми, шнекові та ланцюгові транспортуючі пристрої. Дані механізми становлять основну частину навантаження, оскільки працюють безпосередньо з великою масою матеріалу і мають значну потужність.

Згідно з ВНТП 05-88 «Відомчі норми технологічного проектування хлібоприймальних підприємств та елеваторів» [3], питомі витрати електроенергії для елеватора становлять 4,5 кВт·год/т продукції, що дає змогу визначити розрахункове навантаження підприємства залежно від обсягу переробки або зберігання зерна. Наприклад, при середньодобовому вантажообігу 500 тон електроспоживання сягатиме 2250 кВт·год.

Крім технологічного обладнання, до значних споживачів електроенергії належать системи освітлення (штучного і аварійного), вентиляції, температурного моніторингу зерна, автоматизованого управління, а також системи безпеки (сигналізація, відеоспостереження, пожежогасіння).

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливу увагу слід приділити електродвигунам, які застосовуються практично в кожному основному механізмі елеватора. Вони можуть бути як постійного, так і змінного струму, з прямим або частотним регулюванням, а їх сумарна встановлена потужність часто перевищує кілька сотень кіловат. Для забезпечення їх ефективної та безпечної роботи передбачаються системи захисту, автоблокування та резервування.

Також важливо враховувати споживання допоміжних служб: лабораторій, адміністративних приміщень, побутових корпусів, які, хоча й не створюють великого навантаження, потребують стабільного та якісного електроживлення.

Таким чином, правильне визначення складу та потужності основних електроспоживачів є необхідною умовою для розробки ефективної системи електропостачання елеватора.

### 1.3. Нормативні вимоги до систем електропостачання та електроживлення пристроїв підприємств зберігання зернових культур

Основними нормативними документами для побудови систем електроживлення пристроїв підприємств зберігання зернових культур – Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, державні будівельні норми України підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна (ДБН в.2.2-8-98) і Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві (ДНАОП 2.0.00-1.01-00).

Згідно з Правилами улаштування електроустановок, за надійністю електропостачання, споживачі підприємств зберігання зерна відносять до споживачів другої категорії. Це означає що перерва електропостачання підприємств зберігання зернових культур призводить до недовідпуску продукції, простоїв робітників, механізмів. З вищевказаного виходить, що

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підприємства зберігання зернових культур необхідно забезпечувати електроенергією від двох незалежних взаєморезервуючих джерел живлення, переривання в електропостачанні від одного джерела є допустимим на час до ввімкнення резервного діями чергового персоналу. Апарати захисту від коротких замикань, повинні вимикати мережі раніше, ніж струми перевантажень призведуть до підвищення температури провідників до небезпечного значення для ізоляції, з'єднань і навколишнього середовища.

Технологічне обладнання підприємств через їх розподільчі електромережі здійснює значний вплив на електроенергію, якість якої, як і будь-якої іншої продукції, характеризується певними встановленими нормативною документацією (ДСТУ 3466–96, ГОСТ 13109–97) показниками [4].

Нормування значень показників якості електроенергії (ПЯЕ) відноситься до найважливіших проблем якості електроенергії. Систему ПЯЕ утворюють кількісні характеристики повільних (відхилення) та швидких (коливання) змін діючого значення напруги, її форми та симетрії у трифазній системі, а також зміни частоти. Принципи формування ПЯЕ засновані на техніко-економічних обґрунтуваннях і мають енергетичний зміст, межі допустимих значень, нормуються протягом певного інтервалу часу із заданою ймовірністю для отримання достовірних та співставних значень. Допустимі значення ПЯЕ вказуються на затискачах електроприймачів та у вузлах електричних мереж. При недотриманні встановлених норм ПЯЕ неможливо забезпечити електромагнітну сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та електричних мереж споживачів електричної енергії. Так, основною причиною виникнення аварій і низької енергоефективності електромеханічних систем – електроприводів з синхронними й асинхронними двигунами є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, відсутність ефективного захисту двигунів, несвоєчасне

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт, недостатній рівень експлуатації тощо [5].

Крім зазначених нормативних документів, до переліку обов'язкових також належать Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98) та ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги в системах електропостачання загального призначення», які регламентують допустимі коливання параметрів електроенергії, включаючи напругу, частоту, симетрію фаз тощо. Особливу увагу слід приділяти відповідності нормам приєднаного та максимального навантаження до встановленої категорії надійності живлення.

У контексті зерносховищ важливою вимогою є забезпечення електробезпеки, особливо в умовах підвищеної вологості та запиленості, що є типовим середовищем на елеваторах. Згідно з ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2007, електроустановки мають бути оснащені пристроями захисного відключення (ПЗВ), які реагують на струми витоку, з метою запобігання ураженню електричним струмом.

Також слід враховувати вимоги щодо заземлення і занулення, які детально регламентовані ПУЕ. Системи заземлення повинні забезпечувати допустимий опір і бути ефективними в будь-яких умовах експлуатації, враховуючи сезонні коливання вологості ґрунту. Необхідно також передбачити захист від перенапруг, у тому числі атмосферного походження, для запобігання виходу з ладу електроустаткування.

На сучасному етапі розвитку енергетичних систем актуальними є питання впровадження енергоефективних технологій згідно з Законом України «Про енергозбереження». Рекомендується встановлення засобів автоматичного регулювання споживання електроенергії, а також систем моніторингу енергоспоживання, що дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативних показників та приймати відповідні технічні рішення.

						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням зазначених норм, проектування та експлуатація систем електропостачання на підприємствах зі зберігання зернових культур має здійснюватися не лише з технічної, але й з екологічної та енергетичної ефективності точки зору, що відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку.

#### 1.4. Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу встановлено, що ефективне функціонування зернового елеватора як технологічно складного енергомісткого об'єкта напряму залежить від правильно організованої системи електропостачання, яка повинна відповідати сучасним нормативно-технічним вимогам.

З метою забезпечення безперервності технологічного процесу, енергоефективності та електробезпеки, рекомендується:

- передбачати живлення підприємства від двох незалежних, взаєморезервуючих джерел електроенергії;
- застосовувати надійні засоби захисту від перевантажень, коротких замикань та перенапруг;
- впроваджувати системи автоматизованого управління електроприводами та дистанційного моніторингу параметрів електроенергії;
- дотримуватися вимог щодо якості електроенергії відповідно до діючих стандартів;
- забезпечувати електробезпеку персоналу шляхом реалізації заходів заземлення, занулення та використання ПЗВ.

Реалізація вищезазначених підходів створює передумови для стабільної роботи елеваторного комплексу, підвищення надійності енергозабезпечення, продовження строків служби обладнання та зниження експлуатаційних витрат. Такий підхід узгоджується з вимогами сталого розвитку агропромислового комплексу України.

						Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 АНАЛІЗ ПИТАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 2.1 Реактивна потужність та коефіцієнт потужності

Вся електрична енергія, що виробляється на електростанціях і підстанціях і споживається різними приймальними пристроями, класифікується на активну енергію і реактивну енергію. Активна енергія забезпечує корисну роботу електроприймачів, таких як електродвигуни, печі, освітлювальні, зварювальні апарати тощо, і перетворюється в них на механічну, теплову, світлову та інші види енергії. Реактивна енергія не виконує ніякої корисної роботи, а витрачається на виробництво магнітного потоку в асинхронних двигунах, трансформаторах, синхронних машинах та іншому електрообладнанні, при чому робота була пов'язана з намагнічуванням сталевих сердечників [6]. Реактивна енергія надходить від джерела живлення (наприклад, генератора) до навантаження, а потім назад до джерела живлення. Наявність реактивної енергії в енергосистемі істотно впливає на її роботу та економічні показники. Енергія, яка споживається або отримується за одиницю часу, називається потужністю. Тому потужність поділяється на активну і реактивну. При цьому повна потужність становить

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.1)$$

де  $Q$  – реактивна потужність, кВАр;  $P$  – активна потужність, кВт;  $S$  – повна потужність, кВ·А.

При цьому

$$P = S \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$Q = \sqrt{3}U \sin \varphi, \quad (2.3)$$

де  $U$  – напруга, В;  $\varphi$  – кут зсуву фаз між струмом і напругою;  $I$  – струм, А.

Величина  $\cos \varphi$  називається коефіцієнтом потужності, тому що вона показує, яка частка повної (уявної) потужності генератора, трансформатора

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

тощо перетворюється в активну потужність. Збільшення реактивної потужності зменшує  $\cos \varphi$ , що призводить до недовикористання встановленої потужності генератора або трансформатора. Наприклад, якщо на підстанції є трансформатор встановленою потужністю 1000 кВА, то при коефіцієнті потужності навантаження 0,5 він може видати 500 кВт активної потужності без перевантаження струмом, що перевищує допустиму норму.

Якщо якимось чином збільшити коефіцієнт потужності навантаження до 0,85, то виходить 850 кВт, або в 1,7 рази більше активної потужності.

На величину реактивної потужності впливає напруга та частота струму мережі. Наприклад, якщо напруга збільшиться всього на 1% або зменшиться частота, то реактивна потужність асинхронного двигуна або трансформатора збільшиться на 2 – 3% [7].

Якщо реактивна потужність зростає, а активна залишається, то струм, що протікає по дроту, збільшиться, тому потрібно буде збільшити площу поперечного перерізу лінії електропередачі, а також збільшиться кількість металу, який використовується при виготовленні. На підприємствах-виробниках асинхронні двигуни є основними споживачами реактивної енергії, на них припадає приблизно 65 – 70% загальної реактивної енергії. Трансформатор споживає 20 – 25% і близько 10% йде на повітряну мережу та інше електроприймаюче обладнання. Концепція реактивної потужності дозволяє математично або графічно представити низку процесів в електричній мережі у вигляді діаграм сигналів або векторних діаграм.

Досвід проектування та експлуатації електричних мереж показує, що за допомогою реактивної потужності можна вирішити багато важливих завдань, наприклад, підвищення ефективності всієї мережі та окремих її частин (за рахунок компенсації), регулювання напруги, підвищення потужності та ін. Підвищує стабільність вузлів навантаження і сприяє стабільності паралельної роботи генераторів станції і системи. Коли є дефіцит реактивної потужності,

						Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівень напруги в мережі, як відомо, падає, і коригування коефіцієнтів перетворення для підтримки цього часто не покращує ситуацію [8].

Подальше збільшення дефіциту реактивної потужності може порушити статичну стійкість. Таким чином, реактивна потужність повинна використовуватися як фізичне поняття та математична величина при аналізі та синтезі енергетичних мереж. Однак це часто викликає труднощі у використанні, наприклад інтегрування часу, додавання фази в асиметричних режимах і гармонічний аналіз. Крім подібності з поняттям активної потужності, при використанні поняття реактивної потужності необхідно враховувати його суттєві відмінності та особливості. Його найважливіша властивість полягає в тому, що середній період у всіх фазах і всіх точках мережі дорівнює нулю. У будь-який момент часу сума миттєвих значень всіх трьох фаз дорівнює нулю. Можливість забезпечення компенсації реактивної потужності вузлів електромереж і споживачів без участі електростанцій. Розглянемо взаємозв'язок і залежність струму, напруги, повної потужності, активної потужності та реактивної потужності в синусоїдальному колі змінного струму.

Якщо миттєві значення напруги і струму відображаються як

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t \quad (2.4)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.5)$$

їх добуток є виразом миттєвої потужності

$$S = ui = 2UI \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.6)$$

Повна потужність

$$S = UI(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - UI \sin \varphi \sin 2\omega t \quad (2.7)$$

При  $\varphi = 0^\circ$  друга частина виразу має нульове значення. Миттєве значення повної потужності

$$S = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) \quad (2.8)$$

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показано на хвильовій діаграмі (рис. 2.1), знаходиться між нулем і максимальним значенням та не міняють свій знак.

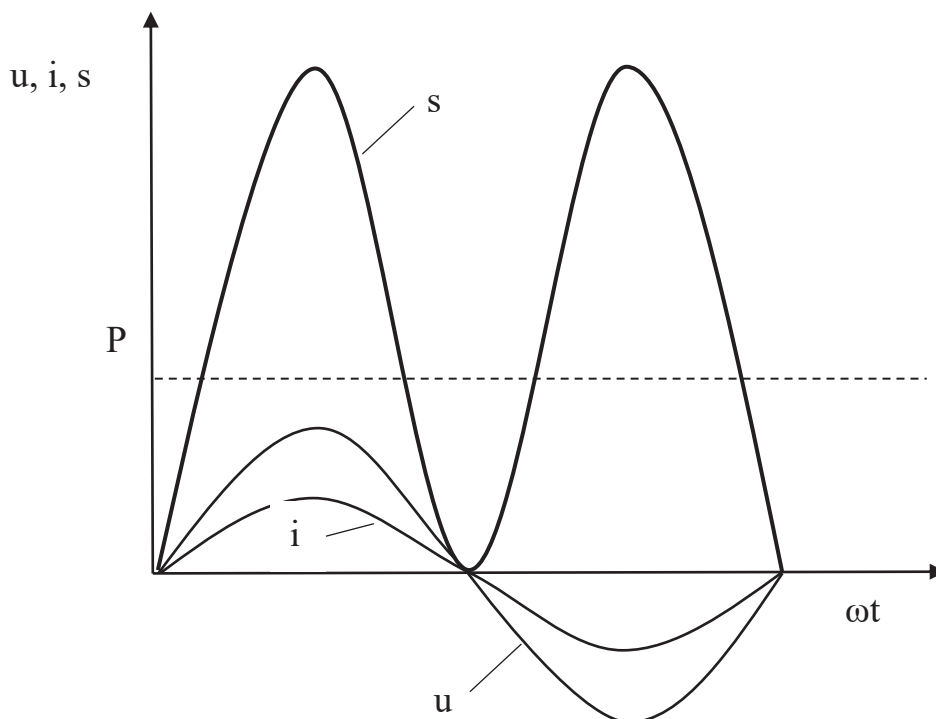


Рисунок 2.1 – Графічна залежність миттєвих значень потужності при  $\varphi = 0^\circ$ .

Середнє значення за період величини називається активною потужністю.

$$S_c = UI \cos \varphi = P \quad (2.9)$$

При  $\varphi = 90^\circ$  перша частина виразу (2.8) перетвориться на нуль, а миттєве значення потужності

$$S = UI \sin \varphi \sin \omega t \quad (2.10)$$

представлено на хвильовій діаграмі (рис. 2.2). Середнє значення потужності за період дорівнює нулю.

Коли така сила існує десь у колі, як показано у формі хвильової діаграми на рисунку 2.2, тобто  $\varphi = 90^\circ$ , в іншій частині кола, зображеній кутом  $\varphi = -90^\circ$ , завжди є ступінь протилежного знаку(рис. 2.2, б). Дана сила не виконує роботи,

проте відображає процес взаємодії між магнітним полем та електричним полем, які взаємно зумовлюють виникнення одне одного. Такий процес є необхідною та невід'ємною складовою механізму передавання електричної енергії будь-якого типу.

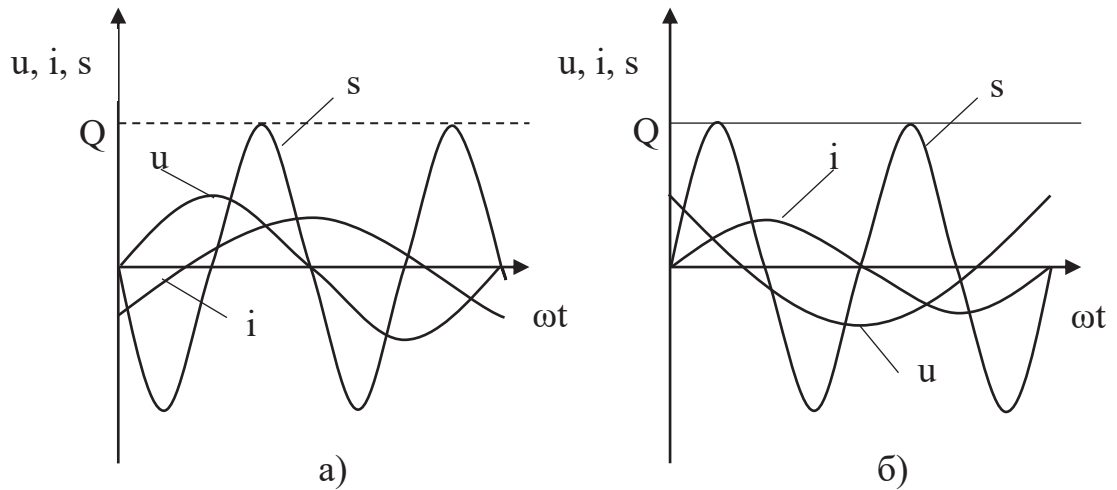


Рисунок 2.2 – Графічні залежності миттєвих значень потужності при  $\varphi = 90^\circ$  (а), та при  $\varphi = -90^\circ$  (б)

Амплітуда реактивної потужності у рівнянні (2.10) дорівнює

$$Q = 2UI \sin \varphi \quad (2.11)$$

На рис. 2.3 показано хвильові діаграми при  $\varphi = 45^\circ$ . Активну потужність визначають, як середнє значення функції  $S(t)$  за період, а реактивну – як амплітуду від'ємного значення  $S(t)$ .

Вираз повної потужності у комплексній формі

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I} = Ue^{+j\varphi_u} Ie^{-j\varphi_i} = UIe^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = UIe^{j\varphi} \quad (2.12)$$

де  $\dot{I}$  - спряжене комплексне значення величини струму. Тоді

$$\dot{S} = UI \cos \varphi \pm jUI \sin \varphi = P \pm jQ \quad (2.13)$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = P/S$$

або коефіцієнт реактивної потужності

$$\operatorname{tg} \varphi = Q/P.$$

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	18

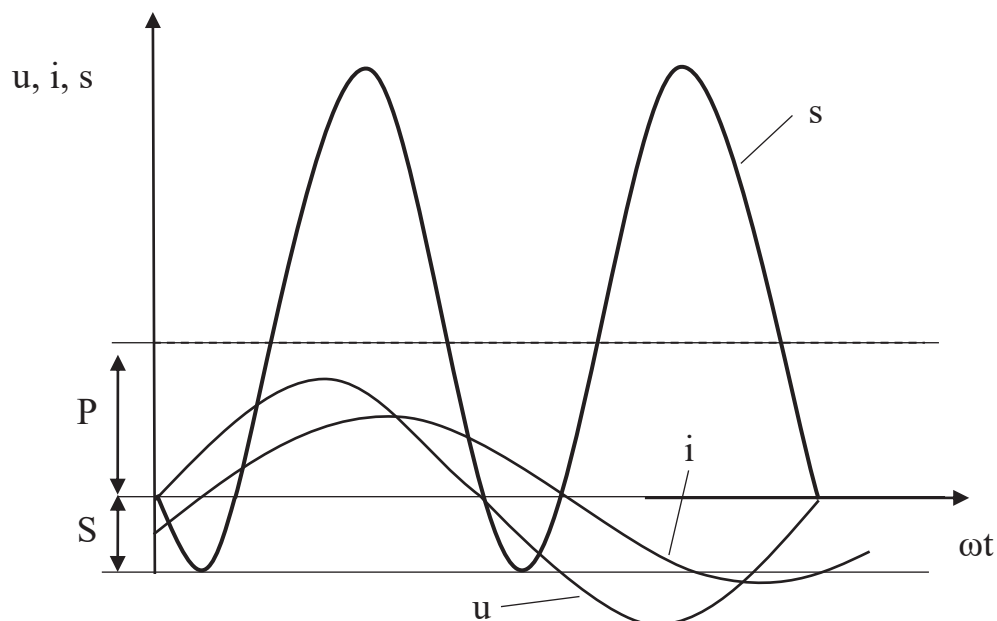


Рисунок 2.3 – Графічні залежності миттєвих значень потужності при  $\varphi = 45^\circ$ .

Значення величини  $\text{tg } \varphi$  в умовах високих значень  $\cos \varphi$  вважається такою величиною, що краще описує вплив реактивної потужності.  $\text{tg } \varphi$  є розрахунковою величиною в нормативних документах значення.

При використанні цих коефіцієнтів вказується їх характер (ємнісний, індуктивний). Реактивна потужність циркулює в колі, коли увімкнені індуктивні чи ємнісні елементи: індуктивність споживає, а ємність віддає реактивну потужність. Більшість споживачів електричної енергії мають активний індуктивний характер, а потужність навантаження записується у форматі [9]:

$$\dot{S} = P + jQ \tag{2.14}$$

Активно-ємнісний характер навантаження

$$\dot{S} = P - jQ \tag{2.15}$$

Зернові елеватори, як об'єкти агропромислового комплексу, є значними споживачами електричної енергії, яку отримують із загальної енергосистеми

через електромережі. У роботі елеваторів широко використовуються асинхронні електродвигуни – вони приводять у дію транспортери, норії, вентилятори, компресори та інше технологічне обладнання. Крім того, на елеваторах функціонують трансформатори, системи освітлення, зварювальні апарати, електронагрівальні установки, що також споживають електроенергію. Значна частина цього обладнання є джерелом реактивної потужності, що викликає додаткові навантаження на електромережу і потребує впровадження ефективних заходів з компенсації для підвищення енергоефективності та надійності енергопостачання підприємства.

Обладнання, що використовується на зернових елеваторах, споживає не лише активну, але й реактивну потужність, причому остання споживається одночасно з реальною. Величина реактивної складової залежить від низки чинників: конструктивних особливостей електроприймачів, режимів їхньої роботи, параметрів електропостачання тощо. Наприклад, для асинхронного двигуна за навантаженням 50 % від номінальної потужності значення тангенса кута зсуву фаз ( $\text{tg } \varphi$ ) може змінюватися від 0,85 для потужних двигунів (близько 2000 кВт) до 2,5 для малопотужних (1 кВт). Зі зростанням напруги  $\text{tg } \varphi$  зменшується, а  $\text{cos } \varphi$ , навпаки, зростає, що позитивно впливає на енергоефективність.

На елеваторах рідше, але іноді також використовуються зварювальні апарати чи електронагрівальні установки (наприклад, для обігріву повітря або сушіння зерна), які можуть мати низький коефіцієнт потужності – в межах 0,2 – 0,5. Це створює додаткове навантаження на електромережу підприємства, зменшує пропускну здатність ліній, збільшує втрати енергії та потребує заходів компенсації реактивної потужності.

У середньому природний коефіцієнт потужності на зернопереробних підприємствах можна оцінити на рівні 0,7 – 0,75, що є недостатнім для ефективної роботи енергосистеми. Без впровадження систем компенсації (зокрема за допомогою батарей конденсаторів, синхронних компенсаторів чи

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

активних пристроїв компенсації) неможливо досягти стабільної роботи обладнання, уникнути штрафів за низький  $\cos \varphi$  та зменшити енергетичні втрати.

## 2.2 Методи застосування компенсуючих пристроїв

Принцип компенсації реактивної потужності полягає в наступному: як було встановлено, струм, що проходить через конденсатор, випереджає прикладену до нього напругу на  $90^\circ$ , в той час як струм, що проходить через котушку індуктивності, відстає від прикладеної напруги на  $90^\circ$ . Таким чином, ємнісний струм протилежний індуктивному струму і індуктивна потужність, що йде на створення електричного поля, протилежна за напрямком реактивної потужності, що йде на створення магнітного поля. Тому реактивний струм і реактивна потужність вважаються умовно негативними по відношенню до струму намагнічування і потужності намагнічування, умовно прийнятими позитивними. Таким чином, чисельно рівні реактивні потужності ємності (QC) і намагнічування (QL) взаємно «компенсуються» ( $QC - QL = 0$ ) і мережа розвантажується від протікання реактивної складової струму навантаження [10].

Принцип компенсації за допомогою ємнісного струму пояснює векторна діаграма на рис. 2.4.

Ємність конденсатора С, підключеного паралельно навантаженню, що містить активну R та індуктивну L складові, підбирають такий, щоб струм  $I_c$ , що проходить через конденсатор, був по можливості близький по абсолютній величині до індуктивного струму  $I_L$ . З рис. 2.4 видно, що підключення конденсатора С дало можливість зменшити кут зсуву фаз між струмом і напругою навантаження з величини  $\varphi_1$  до величини  $\varphi_2$  і відповідно підвищити коефіцієнт потужності навантаження. Збільшуючи ємність, можна повністю компенсувати реактивну потужність навантаження, коли  $\varphi = 0$ .

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

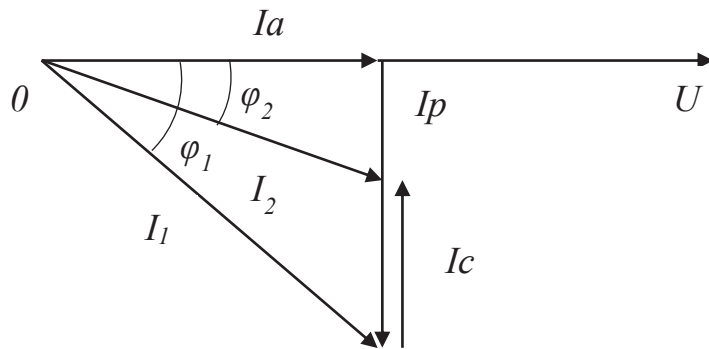


Рисунок 2.4 – Принцип компенсації реактивного струму намагнічування:  
 $I_a$  – активна складова струму,  $I_r$  – реактивна складова струму,  $I_c$  – ємнісна складова струму,  $I$  – значення повного струму,  $U$  – напруга,  $\varphi$  – кут зсуву фаз між струмом і напругою навантаження

В основному компенсація реактивної електроенергії застосовується для:

- зниження активних втрат електроенергії в лініях живлення;
- розвантаження силового обладнання від протікання через нього реактивної потужності;
- зниження оплат за реактивну електроенергію;
- підвищення напруги.

Для зменшення перетоків реактивної потужності по лініях і трансформаторах – джерела реактивної потужності повинні розташовуватися поблизу місць її споживання. При цьому передавальні елементи мережі розвантажуються від реактивної потужності, чим досягається зниження втрат активної потужності і напруги.

До застосування пристроїв компенсації реактивної потужності повинен передувати ретельний техніко-економічний аналіз в зв'язку з високою вартістю і достатньою складністю цих пристроїв.

Методи застосування компенсуючих пристроїв в залежності від місця їх розташування в електроенергетичній системі поділяються на такі види: індивідуальні, групові, централізовані. При індивідуальній компенсації

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конденсатор підключається прямо до місця виникнення реактивної потужності, тобто свій конденсатор до асинхронного двигуна, індивідуальний – до зварювального апарата, окремий конденсатор – для індукційної печі, для трансформатора і т.д. Таким чином від реактивних струмів розвантажуються дроти живлення, які підходять до конкретного споживача. На рис. 2.5 показана схема індивідуальної компенсації.

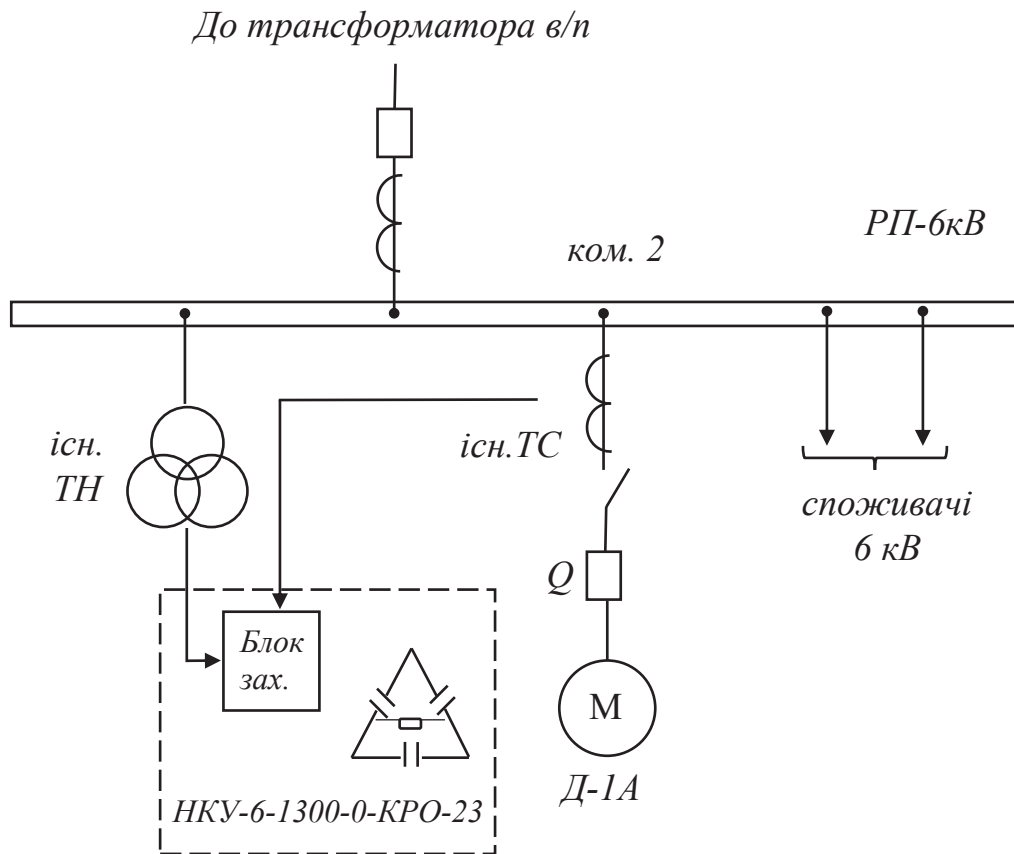


Рисунок 2.5 – Схема індивідуальної компенсації: ТС – існуючий трансформатор струму; РП – розподільчий пристрій; ТН – трансформатор напруги; НКУ – нерегульована конденсаторна установка; Д-1А – двигун навантаження; в/п – власні потреби

Групова компенсація – має на увазі підключення одного загального конденсатора або загальної групи конденсаторів відразу до декількох споживачів зі значними індуктивними складовими. Лінія яка живить дану

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	23

групу споживачів виявиться розвантажена від реактивної потужності. На рис.2.6 показана схема групової компенсації.

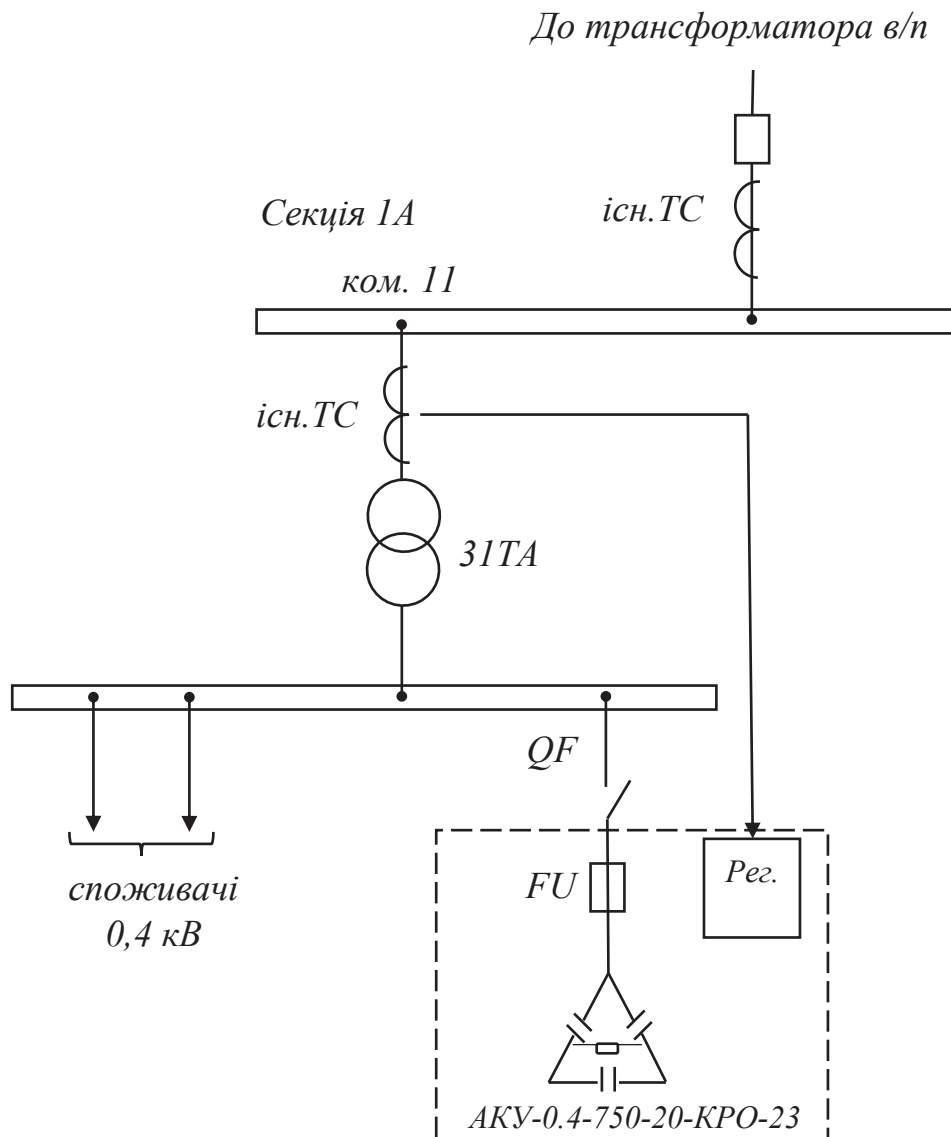


Рисунок 2.6 – Схема групової компенсації: ТС – існуючий трансформатор струму; АКУ – автоматична конденсаторна установка; 31ТА – трансформатор масляний; Рег. – регулятор; в/п – власні потреби; QF – автоматичний вимикач; FU – запобіжник.

					Арк.
					24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Централізована компенсація передбачає установку конденсаторів з регулятором в головному або груповому розподільному щиті. Регулятор оцінює в режимі реального часу поточне споживання реактивної потужності, і оперативно підключає і відключає необхідну кількість конденсаторів. В результаті споживана від мережі сумарна потужність завжди зводиться до мінімуму відповідно до миттєвої величини необхідної реактивної потужності. На рис. 2.7 показана схема централізованої компенсації.

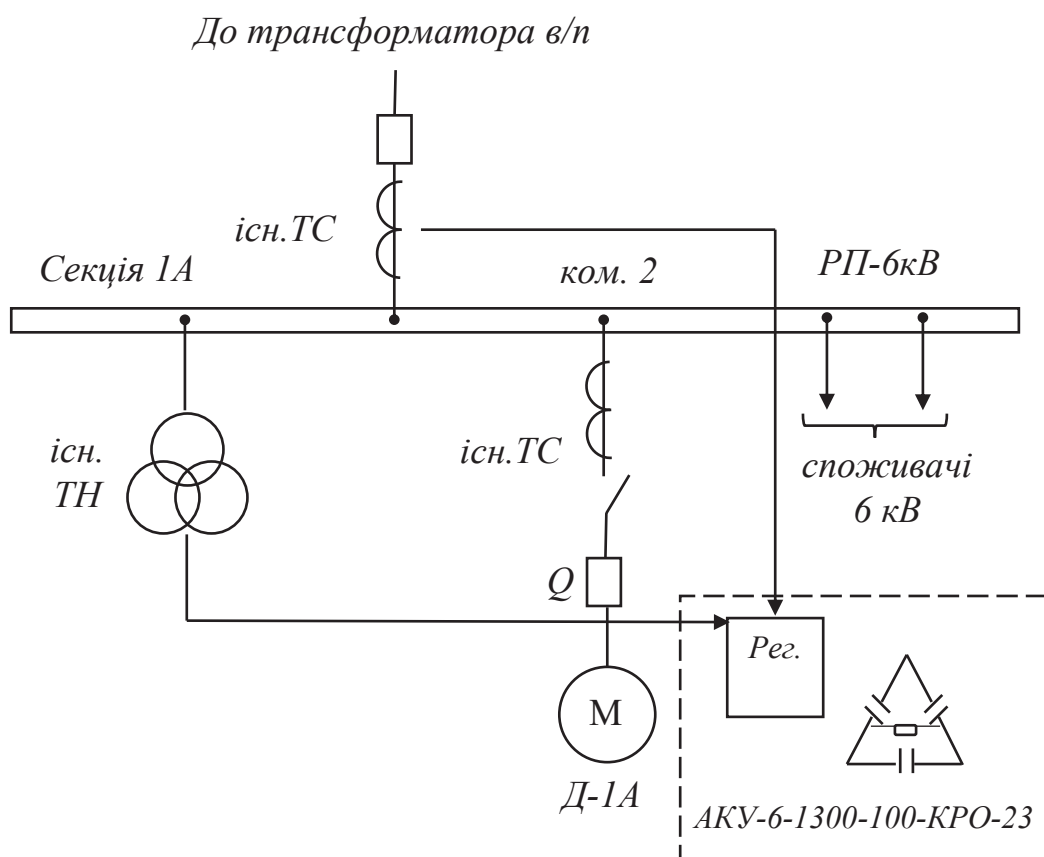


Рисунок 2.7 – Схема централізованої компенсації: ТС – існуючий трансформатор струму; РП – розподільчий пристрій; ТН – трансформатор напруги; АКУ – автоматична конденсаторна установка; Д-1А – двигун навантаження; в/п – власні потреби; Q – вимикач

## 2.3 Порівняння і аналіз пристроїв компенсації реактивної потужності в електричних мережах

На практиці для компенсації реактивної потужності використовують різні пристрої. До них відносяться: конденсаторні батареї, синхронні компенсатори, шунтуючі реактори, статичні тиристорні компенсатори, фільтри вищих гармонік.

Конденсаторні батареї видають реактивну потужність у систему. Оскільки знижуються перетоки потужності в самій мережі, це призводить до зменшення втрат активної потужності, зниженню втрат напруги, знижується навантаження на лінії електропередачі і трансформатори. Синхронний компенсатор являє собою синхронний двигун полегшеної конструкції, призначений для роботи на холостому ході. При роботі в режимі перезбудження він генерує реактивну потужність [11].

Шунтуючі реактори, що споживають реактивну потужність, компенсують надлишок реактивної потужності, знижують її перетікання і зменшують струм у лініях і трансформаторах, внаслідок, знижують активні втрати потужності. Статичні тиристорні компенсатори як видають, так і споживають реактивну потужність, але вони дозволяють плавно і швидко регулювати реактивну енергію. Статичні тиристорні компенсатори в електричних мережах призначені для підвищення пропускної спроможності і стійкості лінії електропередачі, стабілізації напруги у вузлах навантаження, зменшення втрат електроенергії і підвищення її якості.

При виборі пристроїв компенсації реактивної потужності слід враховувати складність ремонту і експлуатації, їхню вартість і ефективність. Наприклад, статичні тиристорні компенсатори мають складну конструкцію і високу вартість. Синхронні компенсатори для ефективної роботи повинні встановлюватися якомога ближче до споживача, щоб не навантажувати мережу реактивними струмами. Фільтрокомпенсуючі пристрої дуже коштовні, тому їх

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

раціонально застосовувати тільки для стаціонарних навантажень. Недоліком шунтуючих реакторів є те, що вони викликають падіння напруги мережі. Найбільш конструктивно простими і економічними пристроями є конденсаторні батареї. Вони мають тривалий строк служби, мають можливість підключатися безпосередньо до шин як низької, так і високої напруги, мають малі втрати активної потужності. Статичні батареї конденсаторів прості в експлуатації, мають порівняну легкість операцій при монтажі, можлива як їх як внутрішня так і зовнішня установка [12].

Батарея статичних конденсаторів (БСК) складається із конденсаторної батареї, струмообмежуючого реактора, шафи комутації і захисту БСК з вимірюючими трансформаторами струмів. Основний елемент БСК – косинусні конденсатори для кожної фази. Конструкція конденсаторної батареї представляє собою збірку з блоків силових високовольтних конденсаторів, розміщених у зварених металевих рамах. Блоки з'єднуються між собою паралельно і послідовно, встановлюються вертикально у декількох рівнях на опорних ізоляторах. Трифазна батарея містить три однофазні конструкції, які з'єднуються у зірку або трикутник в залежності від режиму роботи нейтралі. Системи компенсації бувають одиничні – там де потрібна компенсація потужних (більш 20 кВт) споживачів або споживана потужність постійна впродовж довгого часу; групові – у випадку компенсації індуктивних навантажень, підключених до одного розподільчого пристрою або розташованих рядом; централізовані – для підприємств зі змінною потребою реактивної потужності. В цьому випадку конденсаторна батарея оздоблюється спеціальним контролером і комутуючою і захисною апаратурою. Перевагою централізованої компенсації є відповідність включеної потужності конденсаторів в конкретний момент часу без перекомпенсації або недокомпенсації.

При виборі конденсаторної установки потрібну потужність визначають [13]:

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_c = P \times (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (2.16)$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_1 = Q_1/P_1$  – співвідношення потужностей споживача до установки БСК;  
 $\operatorname{tg} \varphi_2 = Q_2/P_2$  – співвідношення потужностей споживача після установки БСК  
 (бажаний або що задається енергосистемою).

#### 2.4. Висновки до розділу

Для зернового елеватора, де основними споживачами електроенергії є асинхронні електродвигуни транспортерів, вентиляторів, норій та іншого технологічного обладнання, характерне стабільне та переважно індуктивне навантаження. У таких умовах найбільш доцільним рішенням для компенсації реактивної потужності є застосування батарей статичних конденсаторів. Це дозволяє підвищити коефіцієнт потужності з початкових значень 0,7 – 0,75 до рівня 0,93 – 0,99, що суттєво знижує втрати в електричних мережах, підвищує енергоефективність системи електропостачання елеватора та зменшує плату за спожиту електроенергію.

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 АНАЛІЗ І КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕВАТОРА

#### 3.1 Аналіз технологічного процесу зернового елеватора

У даній роботі об'єктом дослідження є зерносховище з обсягом зберігання до 200 000 тонн, розташоване в смт Вапнярка Вінницької області. Це — комплекс технологічного обладнання, призначеного для приймання, очищення, сушіння, зберігання та відвантаження зерна. Його ефективне функціонування забезпечується злагодженою роботою механізмів, які утворюють єдиний технологічний процес.

Загальна структура зернового елеватора, що досліджується:

- технологічне обладнання приймального пристрою з автотранспорту на два проїзди – 1;
- норійно-очисні вежі – 1;
- зерносушарки – 2;
- силоси вологого зерна – 6;
- силоси зберігання зерна – 20;
- норійні вежі – 3;
- бункери відпуску зерна на автотранспорт – 3;
- бункери відпуску відходів на автотранспорт – 3;
- приймально-відпускні пристрої на залізничний транспорт з вагами – 2;
- ваги залізничні – 2;
- транспортерні галереї – 4;
- лебідки – 2.

Технологічний процес зернового елеватора включає послідовні етапи приймання, очищення, сушіння, зберігання та відвантаження зерна. Після приймання зерно направляється на очистку за допомогою сепараторів, що

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

видаляють домішки та сміття. Далі зерно проходить сушіння в зерносушарках, що дозволяє знизити вологість до оптимального рівня для зберігання. Зберігання здійснюється у спеціалізованих силосах, які обладнані системами аерації для підтримання якості зерна та запобігання псуванню.

Взаємодія технологічного обладнання забезпечує безперебійність та ефективність виробничого процесу. Система керування автоматизує роботу основних вузлів, регулюючи параметри процесу, контролюючи температуру і вологість зерна.

Енергетичні потреби комплексу є значними і включають як активну потужність на приводах обладнання, так і реактивну потужність через індуктивні навантаження електродвигунів. Тому для надійної роботи елеватора необхідно здійснити детальний аналіз і розрахунок електричних навантажень, що дозволить оптимально спланувати систему електропостачання.

Ефективність технологічного процесу залежить від безперервної роботи електроприймачів та їх узгодженого функціонування, що вимагає ретельного розгляду як технологічної, так і електротехнічної частини системи.

### 3.2 Розрахунок електричних навантажень елеватора

Електричне навантаження зернового елеватора формується за рахунок сукупної роботи технологічного обладнання, яке забезпечує основні етапи переробки та зберігання зерна. Для коректного проектування системи електропостачання необхідно визначити повну встановлену потужність споживачів, розрахункове навантаження, а також максимальні струми, що проходять по елементах мережі.

Для визначення розрахункових навантажень, користуючись методом упорядкованих діаграм визначаємо коефіцієнт використання та коефіцієнт потужності для кожного споживача.

$$P_p = K_p \times P_v \quad (3.1)$$

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$P_p$  – розрахункова потужність в максимум навантаження, кВт;  $K_p$  – коефіцієнт попиту;  $P_v$  – встановлена потужність кожного споживача, кВт. Результати, розрахунків для електроприймачів заносимо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні електроприймачі зернового елеватора

№ п/п	Найменування електроприймачів	$P_v$ , кВт	$K_p$	$\cos\phi$	$P_p$ , кВт
1	2	3	4	5	6
1	Під'ємно-транспортне обладнання	2083,100	0,8	0,8	1666,48
2	Сервісні двигуни норій	12,100	0,2	0,8	2,42
3	Сепаратори з аспіраційними системами	79,900	1	0,8	79,90
4	Система аерації силосів зберігання зерна	1200,000	0,5	0,8	600,00
5	Система аерації силосів вологого зерна	45,000	0,8	0,8	36,00
6	Зачисні шнеки	300,000	0,3	0,8	90,00
7	Зерносушарки	704,400	1	0,8	704,40
8	Авторозвантажувачі	99,000	0,65	0,8	64,35
9	Лебідки	28,000	1	0,65	28,00
10	Засувки та клапани	33,600	0,2	0,65	6,72
11	Ваги з/д	5,000	1	0,8	5,00
12	Контролер	2,000	1	0,7	2,00
13	Робоче та ремонтне освітлення споруд елеватора з щитовою та операторською	12,615	0,8	0,9	10,09
14	Аварійне освітлення споруд елеватора з щитовою та операторською	2,098	1	0,95	2,10
15	Вентиляційні системи споруд елеватора з щитовою та операторською	26,027	0,8	0,85	20,82
16	Опалення споруд елеватора з щитовою та операторською	8,500	0,8	0,95	6,80
17	Прилади пожежної сигналізації, сповіщення про пожежу, ланцюгів сигналізації	1,000	1	0,7	1,00
18	Засувки на обвідній	1,500			
19	Електроприймачі адміністративно-побутового корпусу, автомобільних вагів, пробовідбірник	139,493	0,86	0,9	119,96
20	Електроприймачі насосної станції пожежегасіння з резервуарами води	47,500			

№ п/п	Найменування електроприймачів	P <sub>в</sub> , кВт	K <sub>п</sub>	cosφ	P <sub>р</sub> , кВт
1	2	3	4	5	6
21	Склад зернових відходів	7,000	0,8	0,9	5,60
22	Електроприймачі ШРП	0,100	1	0,7	0,10
23	Електроприймачі майстерні	40,000	0,7	0,75	28,00
24	Зовнішнє освітлення	4,700	1	0,95	4,70
25	Робоче та ремонтне освітлення транспортерних галерей	4,000	0,8	0,95	3,20
26	Аварійне освітлення транспортерних галерей	2,000	1	0,95	2,00
27	Електроприймачі гараж-боксу для тепловозу	4,790	0,8	0,8	3,83
	<b>ВСЬОГО:</b>	<b>4893,423</b>			<b>3493,48</b>

Загальна встановлена потужність усіх електроприймачів становить 4893,423 кВт, однак з урахуванням коефіцієнтів попиту, які враховують реальну ймовірність одночасної роботи обладнання, активна розрахункова потужність у максимумі навантаження складає 3493,48 кВт.

Найбільший внесок у загальну потужність забезпечують:

- підйомно-транспортне обладнання – 1666,48 кВт (з коефіцієнтом попиту 0,8);
- зерносушарки – 704,40 кВт (повне завантаження, K<sub>п</sub> = 1);
- система аерації силосів зберігання зерна – 600,00 кВт (K<sub>п</sub> = 0,5).

Ці три категорії формують основне виробниче навантаження комплексу, що є типовим для зернопереробного об'єкта. Їхня робота має сезонний характер, але на етапах приймання та обробки врожаю вони можуть працювати одночасно, що обґрунтовує вибрані коефіцієнти попиту.

Обладнання допоміжного призначення (сервісні двигуни норій, лебідки, засувки, вентиляція, освітлення, опалення, пожежна сигналізація тощо) має менший енергоспоживчий вплив. Для них встановлені коефіцієнти попиту, як правило, не перевищують 0,8, що відповідає нерегулярному або періодичному режиму роботи.

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Варто зазначити, що для таких електроприймачів, як засувки на обвідній та електроприймачі насосної станції пожежогасіння, не вказано коефіцієнти попиту та  $\cos \varphi$ . Це пояснюється тим, що зазначене обладнання призначене для роботи лише в аварійних або екстрених ситуаціях (наприклад, при пожежі або при збої в основній системі транспортування). У нормальному режимі експлуатації вони залишаються без навантаження, тому не враховуються при розрахунку активної потужності у максимумі навантаження. В разі необхідності ці електроприймачі розраховуються окремо в рамках систем резервного живлення.

Для оцінки повного навантаження енергосистеми слід також враховувати реактивну складову потужності. Для цього у наступних розрахунках визначається повна потужність за формулою:

$$S = P_p \div \cos \varphi, \quad (3.2)$$

що дозволяє розрахувати необхідні параметри для вибору трансформаторного обладнання та комутаційної апаратури.

Таблиця 3.2. Розрахунок повної потужності електроприймачів зернового елеватора

№ п/п	Найменування електроприймачів	$P_p$ , кВт	$\cos \varphi$	$S$ , кВт
1	2	3	4	5
1	Під'ємно-транспортне обладнання	1666,48	0,8	2083,100
2	Сервісні двигуни норій	2,42	0,8	3,025
3	Сепаратори з аспіраційними системами	79,90	0,8	99,875
4	Система аерації силосів зберігання зерна	600,00	0,8	750,000
5	Система аерації силосів вологого зерна	36,00	0,8	45,000
6	Зачисні шнеки	90,00	0,8	112,500
7	Зерносушарки	704,40	0,8	880,500

					Арк.
					33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

№ п/п	Найменування електроприймачів	Pp, кВт	cosφ	S, кВт
1	2	3	4	5
8	Авторозвантажувачі	64,35	0,8	80,438
9	Лебідки	28,00	0,65	43,077
10	Засувки та клапани	6,72	0,65	10,338
11	Ваги з/д	5,00	0,8	6,250
12	Контролер	2,00	0,7	2,857
13	Робоче та ремонтне освітлення споруд елеватора з щитовою та операторською	10,09	0,9	11,211
14	Аварійне освітлення споруд елеватора з щитовою та операторською	2,10	0,95	2,211
15	Вентиляційні системи споруд елеватора з щитовою та операторською	20,82	0,85	24,494
16	Опалення споруд елеватора з щитовою та операторською	6,80	0,95	7,158
17	Прилади пожежної сигналізації, сповіщення про пожежу, ланцюгів сигналізації	1,00	0,7	1,429
18	Електроприймачі адміністративно-побутового корпусу, автомобільних вагів, пробовідбірник	119,96	0,9	133,289
19	Склад зернових відходів	5,60	0,9	6,222
20	Електроприймачі ШРП	0,10	0,7	0,143
21	Електроприймачі майстерні	28,00	0,75	37,333
22	Зовнішнє освітлення	4,70	0,95	4,947
23	Робоче та ремонтне освітлення транспортерних галерей	3,20	0,95	3,368
24	Аварійне освітлення транспортерних галерей	2,00	0,95	2,105
25	Електроприймачі гараж-боксу для тепловозу	3,83	0,8	4,788
	ВСЬОГО:	3493,48		4355,658

Результати розрахунку показують, що сумарна розрахункова активна потужність усіх електроприймачів становить 3493,48 кВт, тоді як сумарна повна потужність – 4355,66 кВА. Це свідчить про наявність значної реактивної складової в загальному навантаженні, що характерно для електромеханічного обладнання елеватора.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	34

Отримані результати є основою для подальшого планування системи електропостачання елеватора, вибору трансформаторів, кабельної продукції, а також для розробки заходів щодо компенсації реактивної потужності з метою підвищення енергоефективності.

### 3.3 Оцінка впливу реактивної потужності

Реактивна потужність (Q) є невід'ємною складовою роботи більшості електроприймачів зернового елеватора, особливо тих, що мають електродвигуни індуктивного типу. Хоча вона не виконує корисної роботи, реактивна потужність створює додаткове навантаження на мережу та джерела електропостачання, знижуючи загальну енергоефективність системи.

На підставі розрахованих у таблиці 3.2 значень активної та повної потужностей загальна реактивна потужність елеватора становить:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.3)$$

де: Q – реактивна потужність, кВАр;

S – повна потужність, кВА;

P – активна потужність, кВт.

$$Q = \sqrt{(4355,66)^2 - (3493,48)^2} \approx \sqrt{18978237 - 12206645} \approx \sqrt{6771592} \\ \approx 2602,22 \text{ кВАр}$$

Отже, сумарна реактивна потужність електроспоживачів елеватора становить приблизно 2602,22 кВАр.

На зернових елеваторах спостерігається інтенсивне використання електрообладнання з індуктивним характером навантаження – електродвигуни транспортерів, вентилятори активного вентилявання, насоси, компресори,

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сепаратори тощо. Це обладнання споживає значну кількість реактивної потужності, що безпосередньо впливає на стабільність і ефективність роботи локальної енергосистеми елеватора:

1. Зниження напруги у внутрішній мережі. У годину пік, коли одночасно працює кілька потужних двигунів (наприклад, під час завантаження або сушіння зерна), спостерігається суттєве зростання реактивного струму. Це призводить до падіння напруги на кабельних лініях і шинопроводах внутрішньої електромережі. В результаті:

- знижується продуктивність обладнання (двигуни втрачають крутний момент);
- підвищується температура обмоток двигунів через зростання струмів, збільшується ймовірність аварійного відключення через спрацювання захистів по напрузі або струму.

2. Зростання втрат електроенергії. Високий рівень реактивної потужності у мережі елеватора призводить до підвищених втрат у силових кабелях, трансформаторах і щитовому обладнанні. Ці втрати не приносять користі, але збільшують витрати на електроенергію. Для великого елеватора (наприклад, зі встановленою потужністю 800–1000 кВт), щомісячні додаткові втрати через низький коефіцієнт потужності можуть сягати десятків тисяч гривень.

3. Зменшення пропускної здатності трансформатора. Трансформатори, встановлені на території елеватора, мають обмежену допустиму потужність. Якщо значну частину цієї потужності займає реактивна складова, залишається менше ресурсу для передачі корисної активної потужності. Наприклад, трансформатор на 1000 кВА при коефіцієнті потужності 0,7 може передавати лише 700 кВт активної потужності, а не всю номінальну потужність.

4. Погіршення стійкості системи в аварійних і перехідних режимах. Під час запуску потужних двигунів (наприклад, норій чи вентиляторів сушарок) виникає короткочасний значний запит на реактивну потужність, що може призводити до просідання напруги в мережі елеватора. Це особливо критично,

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якщо елеватор підключений до слабкої лінії або живиться через довгу повітряну лінію з високим опором. У таких випадках:

- зниження напруги може призвести до самовимкнення обладнання або його виходу з ладу,
- можуть виникати пуски з пониженим моментом, що знижує ресурс електродвигунів.

Цей аналіз демонструє, що проблема реактивної потужності на елеваторі – це не лише питання розрахункової величини, а реальний чинник, що впливає на надійність, енергоефективність та безперебійну роботу всього комплексу.

### 3.4 Розгляд методів компенсації реактивної потужності

Зернові елеватори є енергоємними об'єктами, у складі яких працює велика кількість індуктивних навантажень: асинхронні електродвигуни норій, вентиляторів, шнеків, транспортерів, сушарок тощо. Усі ці пристрої споживають значну кількість реактивної потужності, яка не виконує корисної роботи, проте навантажує мережу, призводить до додаткових втрат електроенергії, зменшення напруги та збільшення плати за електроенергію через низький коефіцієнт потужності.

Для забезпечення ефективної роботи електроустановок елеватора доцільно впроваджувати системи компенсації реактивної потужності. Це дозволить:

- знизити втрати електроенергії в мережі;
- уникнути штрафів за низький  $\cos\phi$ ;
- стабілізувати рівень напруги;
- звільнити потужність трансформаторів і кабельних ліній для реального навантаження;
- підвищити загальну надійність електропостачання.

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижче розглянуто основні методи компенсації, які можуть бути доцільними на елеваторі:

### 1. Батареї статичних конденсаторів

Є одним із високоефективних засобів, які дозволяють зменшити втрати активної потужності та знизити плату постачальнику за спожиту електроенергію [14]. Конденсаторні установки можуть розміщуватись як централізовано – на головному щиті (низької напруги), так і децентралізовано – безпосередньо біля потужних двигунів (наприклад, вентиляторів зерносушарок). Їх застосування дозволяє підтримувати оптимальний коефіцієнт потужності на рівні 0,95 – 1,0. Переваги – простота обслуговування, надійність, невисока вартість.

### 2. Автоматизовані установки компенсації реактивної потужності (АКРП)

У практиці компенсації реактивної потужності на зернових елеваторах широко застосовуються автоматизовані системи керування, які дозволяють оперативно реагувати на зміну навантаження та підтримувати оптимальний рівень коефіцієнта потужності.

Контролер компенсації реактивної потужності — це мікропроцесорний пристрій, до функціональних завдань якого належить вимірювання основних параметрів електричної мережі (напруга, частота, але насамперед – значення коефіцієнта потужності), їх аналіз та вмикання або вимикання джерел реактивної потужності (в випадку конденсаторних установок – батарей конденсаторів) [15].

### 3. Фільтро-компенсуючі установки

У випадках, коли на елеваторі використовуються частотні перетворювачі, інвертори або інше електронне обладнання, зростає рівень гармонічних викривлень у мережі. У таких умовах застосування звичайних конденсаторів може бути недостатнім або навіть шкідливим. В такому разі при вирішенні комплексної задачі компенсації реактивної потужності та покращення якості електричної енергії застосовують спеціалізовані фільтро-компенсуючі пристрої

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(ФКП). В деяких випадках використання ФКП є вимушеним кроком так, як застосування стандартних конденсаторних батарей призводить до їх перевантаження струмами вищих гармонік, і як наслідок, перегріву та швидкому виходу з ладу. До недоліків ФКП слід віднести налаштування на одну частоту (гармоніку), тому потрібно застосування декількох ФКП, що може призвести до перекомпенсації реактивної потужності. Також недоліками ФКП є неможливість регулювання реактивної потужності, що видається. Тож, на нашу думку, для вирішення питання компенсації реактивної потужності в електричних мережах з нелінійним навантаженням слід відокремити питання компенсації реактивної потужності і зниження несинусоїдальності напруги. До того ж останнє можна вирішити сучасними способами з використання «активних» пристроїв придушення гармонік [16].

#### 4. Синхронні компенсатори

В умовах елеваторного виробництва застосовуються рідко через високу вартість, необхідність складного обслуговування та значні габарити. Синхронні компенсатори при своїй роботі з мережі споживають активну потужність (до 4 % від номінальної виробляємої реактивної потужності); а при роботі в режимі недозбудження є споживачами реактивної потужності та мають значно більшу вартість, ніж конденсаторні батареї при однаковій виробляемій реактивній потужності [17]. Проте можуть бути доцільними на великих підприємствах з власними підстанціями або приєднанням до мереж високої напруги, де необхідне плавне регулювання реактивної потужності.

#### 5. Комплексні рішення з компенсації

Для максимального ефекту на елеваторі доцільно комбінувати різні типи компенсації: централізовану (на головних шафах КТП) та локальну (біля двигунів норій, вентиляторів, сушарок). Це дозволяє знизити струми в магістральних лініях і трансформаторах, уникнути перевантаження розподільчих пристроїв та зменшити електромагнітні поля.

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Впровадження систем компенсації реактивної потужності на зерновому елеваторі – це економічно обґрунтований крок до підвищення енергоефективності підприємства. Найоптимальнішими з точки зору співвідношення «ефективність/вартість» є автоматизовані конденсаторні установки з можливістю адаптації до змінного навантаження. При наявності частотних перетворювачів або інших нелінійних навантажень доцільно застосовувати фільтро-компенсуючі пристрої. Грамотне технічне проектування та належна експлуатація таких систем сприяє стабільній роботі обладнання, економії коштів і підвищенню загальної надійності електропостачання елеватора.

### 3.5 Розробка системи компенсації реактивної потужності

Метою даного підрозділу є розробка технічно та економічно обґрунтованої системи компенсації реактивної потужності для зернового елеватора з урахуванням його енергетичних характеристик та особливостей навантаження.

На основі енергоаудиту зернового елеватора встановлено:

- Сумарна активна потужність:  $P = 3493,48$  кВт
- Сумарна реактивна потужність:  $Q = 2602,22$  кВАр
- Поточний коефіцієнт потужності:  $\cos\varphi_1 \approx 0,8$

З метою підвищення енергоефективності було поставлено завдання досягти цільового  $\cos\varphi$  не менше 0,95, що відповідає нормативним вимогам (ДСТУ EN 50160:2023) [18].

Цільовий коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_2 = 0,95$

Для визначення параметрів ефективної установки компенсації реактивної потужності необхідно:

- розрахувати потреби в компенсаційній потужності для досягнення цільового коефіцієнта потужності  $\cos\varphi_2 = 0,95$ ;

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- підбір типу та конфігурації системи компенсації;
- підбір необхідних комплектуючих з використанням програми “Конфігуратор установок РКП” від ЕТІ [19].

Щоб розрахувати необхідну потужність компенсації реактивної складової, скористаємося наступною формулою:

$$Q_{\text{комп}} = P \times (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) \quad (3.4)$$

де:

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

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - 0,8^2}}{0,8} \approx 0,75$$

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2}$$

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} \approx 0,32$$

$$Q_{\text{кв}} = 3493,48 \times (0,75 - 0,32) \approx 1502 \text{ кВАр}$$

Отже, для компенсації реактивної потужності до рівня  $\cos \varphi = 0,95$  потрібно встановити установку потужністю приблизно 1502 кВАр.

Враховуючи характер навантаження елеватора (велика кількість двигунів, змінна активність), рекомендовано централізовану автоматизовану установку компенсації реактивної потужності (УКРМ) зі ступеневим керуванням.

Переваги централізованої УКРМ:

- охоплення всього навантаження підприємства;
- зменшення струмів у мережі;
- покращення якості електроенергії;
- проста діагностика, обслуговування і підключення до енергомоніторингу.

					Арк.
					41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Для вибору комплектуючих установки компенсації реактивної потужності скористаємось Online конфігуратором комплектуючих установки КРП від ЕТІ (ETI SP).

Максимальна номінальна потужність однієї збірки КРП становить 600 кВАр. З огляду на необхідність компенсації реактивної потужності в обсязі близько 1500 кВАр, щитової з двома збірками шин доцільним є застосування чотирьох установок потужністю по 380 кВАр кожна (рис. 3.1) [20]. Вибрані компенсуючі пристрої мають по 10 ступенів регулювання.

**ETI** SWITCH TO A SAFE FUTURE

Пошук продуктів і вмісту  Пошук

Технічна підтримка project@eti.ua

ПРОДУКЦІЯ КАТАЛОГИ ПІДТРИМКА

### Конфігуратор установок КРП

Конфігуратор комплектуючих установок КРП дозволяє підібрати основні компоненти пристрою, такі як конденсаторні батареї, контролер, контактори, ввідний вимикач, запобіжники та тримачі до них.

Установка КРП Установка КРП з фільтруючими дроселями

Основні дані Розподіл потужності по ступеням Список продукції

Потужність, кВАр	ВІАРИАНТИ	ЗНАЧЕННЯ	№	Артикул	Найменування	К-ть
380	30+30+40+40+40+40+40+40+40	30+30+30+40+40+40+40+40+50	1	004656856	Конденсаторна батарея LPC-DW_400V 30 kVAr	8
10	30+30+30+30+40+40+40+50+50	30+30+30+30+30+40+40+50+50	2	004656867	Конденсаторна батарея LPC-DW_400V 40 kVAr	32
4	30+30+30+30+30+40+40+50+50	30+30+30+30+30+30+40+50+50	3	004656907	Регулятор реактивної потужності PFC 12 RS	4
400	25+25+40+40+40+40+40+40+50	25+25+30+30+30+40+40+50+50	4	004661455	Вимикач навантаження LBS 3P 1000 (1000A)	4
	25+25+30+40+40+40+40+40+50	25+25+30+30+40+40+40+50+50	5	004661482	Рукоятка на корпус LBS-DH 3200/B	4
	25+25+30+30+40+40+40+40+50	25+25+30+30+40+40+40+50+50	6	004181213	Запобіжник NH-000/gG 80A 500V KOMBI	24
	25+25+30+30+40+40+40+50+50	25+25+30+30+40+40+40+50+50	7	004181214	Запобіжник NH-000/gG 100A 500V KOMBI	96
	25+25+30+30+40+40+50+50+50	25+25+25+25+40+40+50+50+50	8	001690870	Роз'єднувач KVL 00 3P 160A (Клеми M8-M8)	40
	20+40+40+40+40+40+40+40+40	20+40+40+40+40+40+40+40+40	9	004643821	Контактор CEM CK 30.01N (30 кВАр, 400-440V)	8
	20+30+40+40+40+40+40+40+50		10	004643822	Контактор CEM CK 40.01N (40 кВАр, 400-440V)	32

Рисунок 3.1 – Вибір установки компенсації реактивної потужності потужністю 380 кВАр за допомогою конфігуратора КРП на сайті компанії ЕТІ

Для побудови ефективної установки КРП нам потрібно наступні комплектуючі:

1. Конденсаторна батарея LPC 30 kVAr (400V) – 8 шт.
2. Конденсаторна батарея LPC-DW\_400V 40 kVAr – 32 шт.
3. Регулятор реактивної потужності PFC 12 RS – 4 шт.
4. Вимикач навантаження LBS 3P 1000 (1000A) – 4 шт.

					Арк.
					42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

5. Рукоятка на корпус LBS-DH 3200/B – 4 шт.
6. Запобіжник NH-000/gG 80A 500V КОМБИ – 24 шт.
7. Запобіжник NH-000/gG 100A 500V КОМБИ – 96 шт.
8. Роз'єднувач KVL 00 3P 160A (Клеми M8-M8) – 40 шт.
9. Контактор СЕМ СК 30.01N (30 кВАр, 400-440V) – 8 шт.
10. Контактор СЕМ СК 40.01N (40 кВАр, 400-440V) – 32 шт.

Враховуючи загальну потужність компенсаційної установки (1502 кВАр), доцільним є розміщення обладнання у чотирьох окремих щитах, кожен з яких буде містити повністю функціональну секцію установки компенсації реактивної потужності:

- Щит №1-Щит№4 – УКРП потужністю 380 кВАр (10 ступенів);

Для монтажу обладнання передбачається використання металевих підлогових розподільчих шаф з такими параметрами:

- Тип корпусу: ЩРн або аналог ETIMAT / Schneider Electric / Rittal / ДКС;
- Розміри (орієнтовно): не менше 1000×2000×600 мм;
- Ступінь захисту: не нижче IP31 для внутрішнього встановлення або IP54 при зовнішньому розміщенні;
- Матеріал: сталь з порошковим покриттям, товщина стінок – 1,2 – 2 мм.

Система вентиляції щитів:

У процесі експлуатації УКРП у щиті відбувається нагрівання елементів внаслідок втрат потужності. Ці теплові втрати необхідно враховувати при проектуванні системи вентиляції, щоб запобігти перегріву обладнання та забезпечити його надійну й довговічну роботу.

Основні джерела тепловиділення:

Конденсаторні батареї – у процесі роботи генерують теплові втрати, які зазвичай становлять близько 0,5 – 1% від їх номінальної потужності. Для точного розрахунку приймається середнє значення 0,75%.

						Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контактори – під час роботи контактори утримуються у ввімкненому стані, споживаючи електричну потужність на утримання. Орієнтовне тепловиділення одного контактора становить 20 – 30 Вт, залежно від його типу та номіналу.

Допоміжні елементи – такі як регулятор реактивної потужності, запобіжники, роз'єднувачі, мають незначні втрати, але також враховуються у загальному тепловому балансі.

Для забезпечення надійної роботи електрообладнання та недопущення перегріву елементів УКРП застосовується система примусової вентиляції електроцитів. Її конструкція повинна відповідати вимогам безперебійної експлуатації у виробничих умовах (зокрема, в умовах зернового елеватора, де можливе підвищене пилове навантаження).

До складу вентиляційної системи входять такі основні елементи:

#### 1. Вхідні фільтри та вентиляційні жалюзі

Встановлюються в нижній частині корпусу або дверей щита. Вони забезпечують надходження прохолодного повітря з навколишнього середовища та одночасно виконують функцію пилозахисту. Повітря, що надходить, охолоджує внутрішній простір щита шляхом природної або примусової циркуляції.

#### 2. Витяжні вентилятори з термореле

У верхній частині дверей або корпусу монтуються осьові витяжні вентилятори. Їхнє завдання – виведення нагрітого повітря з середини щита. Вентилятори оснащуються вбудованими або зовнішніми термореле, які вмикають вентилятори лише при досягненні встановленої температури, що дозволяє зменшити знос обладнання та економити енергію.

#### 3. Система автоматичного керування вентиляцією

Керування вентиляторами відбувається за допомогою термостатів, які реагують на температуру всередині корпусу. Типове значення уставки для вмикання вентиляторів – 35 – 40°C. За потреби можуть використовуватись

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатоканальні термостати з можливістю регулювання граничної температури та програмування затримки вимкнення вентиляції.

#### 4. Засоби захисту від перегріву

Для додаткового захисту системи передбачаються:

- температурні реле (термоконтакти), які здійснюють аварійне відключення або сигналізацію у разі перевищення критичної температури;
- індикація перегріву або помилки на регуляторі реактивної потужності;
- опційно – підключення до диспетчерської системи автоматизації (SCADA) або виведення тривожних сигналів на пульт керування.

Сукупна дія наведених елементів забезпечує ефективне охолодження, захист від пилу та стабільну роботу електротехнічного обладнання в умовах підвищеного теплового навантаження.

Тепловиділення в щиті УКРП можна розрахувати за формулою:

$$P_{\text{тепл}} = \sum P_{\text{втрат (елементів)}} \quad (3.5)$$

Формула для загального тепловиділення:

$$P_{\text{тепл}} = P_{\text{конденсаторів}} \times k_{\text{втрат}} + N_{\text{контакторів}} \times P_{\text{конт.одного}} + P_{\text{інше}} \quad (3.6)$$

Для оцінки теплового навантаження, що виникає внаслідок роботи УКРП, виконується орієнтовний розрахунок загального тепловиділення, з урахуванням основних джерел тепловтрат: конденсаторних батарей, силових контакторів та допоміжних елементів.

Вихідні дані:

- Номінальна потужність конденсаторів:  $P_c = 380$  кВАрР
- Коефіцієнт теплових втрат:  $k = 0,007$  (0,7%)
- Кількість контакторів:  $N_k = 10$

						Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Середня потужність одного контактора:  $P_k = 25 \text{ Вт}$

$$P_{\text{тепл}} = 380\,000 \times 0,007 + 10 \times 25 + 100 = 2660 + 250 + 100 = 3010 \text{ Вт}$$

Орієнтовне тепловиділення одного щита на 380 кВАр становить близько 3,01 кВт.

Для забезпечення ефективного охолодження елементів електрощита при природному або примусовому повітрообміні виконується розрахунок необхідної витрати повітря.

Розрахунок проводиться за наступною формулою:

$$Q_{\text{пов}} = \frac{P_{\text{тепл}} \times 3,1}{\Delta t} \quad (3.7)$$

де:  $Q_{\text{пов}}$  – необхідний об'єм повітря ( $\text{м}^3/\text{год}$ ),

$P_{\text{тепл}}$  – сумарні теплові втрати в щиті (Вт),

$\Delta t$  — допустимий перепад температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) між повітрям усередині щита та зовні,

3,1 — коефіцієнт, який враховує питому теплоємність і густину повітря.

Для щита 380 кВАр:

$$Q_{\text{пов}} = \frac{3010 \times 3,1}{10} = 933 \text{ м}^3/\text{год}$$

На основі розрахованого тепловиділення щитів УКРП виконується орієнтовний підбір вентиляційного обладнання для забезпечення ефективного повітрообміну.

Орієнтовно рекомендовані типи вентиляторів – Fandis FPF12K або Rittal TopTherm (або еквівалентні моделі промислового виконання).

Основні технічні характеристики:

- Продуктивність: 600–800  $\text{м}^3/\text{год}$ ;
- Ступінь захисту: IP54 (захист від пилу та бризок води);

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Номінальна напруга живлення: 230 В;
- Спосіб керування: вбудований термостат або зовнішнє термореле.

Рекомендована кількість вентиляторів:

- Для електроцита потужністю 380 кВАр – 1 вентилятор продуктивністю 1000 м<sup>3</sup>/год або 2 вентилятори по 500 м<sup>3</sup>/год.

Система вентиляції повинна керуватись термостатом, який вмикає вентилятори при температурі понад 35 – 40°C всередині корпусу. Це забезпечить надійну роботу конденсаторів та збільшить їх термін служби.

Обрана система забезпечує:

- досягнення цільового коефіцієнта потужності  $\cos\phi = 0,95$ ;
- суттєве зменшення втрат у мережі;
- покращення енергоефективності;
- скорочення витрат на оплату електроенергії та уникнення штрафів.

Проект є технічно виправданим, економічно вигідним і відповідає сучасним вимогам до енергетичного менеджменту.

### 3.6 Формування практичних рекомендацій

Успішне впровадження системи компенсації реактивної потужності (СКРП) на підприємстві потребує чіткого дотримання послідовних етапів – від техніко-економічного обґрунтування до належної експлуатації та обслуговування. Нижче подано деталізований алгоритм дій, який рекомендовано застосовувати для зернового елеватора з урахуванням специфіки його навантаження, електрообладнання та експлуатаційних умов.

#### 1. Організаційно-проектний етап

1.1. Формування технічного завдання (ТЗ). Необхідно скласти чітке технічне завдання на проектування СКРП, у якому слід визначити:

- необхідну сумарну потужність компенсації (1500 кВАр відповідно до розрахунків у підрозділі 3.5);

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- цільовий коефіцієнт потужності після впровадження ( $\cos\phi \geq 0,95$ );
- тип системи (автоматизована багатоступенева);
- особливості підключення (централізована компенсація на вводі або зональна);
- вимоги до захисту, охолодження, моніторингу.

1.2. Розроблення проєктної документації. На основі ТЗ необхідно звернутися до кваліфікованого проєктного бюро для створення робочого проєкту, який повинен враховувати:

- електричні характеристики навантаження елеватора (висока частка індуктивних двигунів, циклічність запуску та зупинки агрегатів);
- особливості електропостачання (категорія надійності, структура мережі, точка підключення);
- вимоги до приміщення для розміщення УКРП (вентиляція, вологість, доступність);
- технічні нормативи: ДСТУ EN 50160, ПУЕ, ПТЕЕС, ДБН.

1.3. Узгодження проєкту. Проєкт підлягає погодженню з енергопостачальною організацією, зокрема в частині зміни режиму споживання реактивної потужності. Це дозволяє уникнути санкцій у майбутньому та офіційно зафіксувати допустимий рівень  $\cos\phi$ .

## 2. Вибір та закупівля обладнання

2.1. Підбір елементної бази. На основі розрахованої потужності компенсації слід здійснити підбір конкретних технічних засобів:

- Конденсаторні установки LPC та LPC-DW відповідної потужності з урахуванням надлишку для компенсації пікових навантажень;
- Регулятори реактивної потужності (PFC-реле) – щонайменше чотири окремі пристрої, що забезпечать незалежну роботу щитів компенсації;
- Контактори та роз'єднувачі — не менш ніж по 40 одиниць, з урахуванням кількості ступенів регулювання;
- Запобіжники типу NV/NH – для захисту кожного конденсатора;

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вентилятори з термореле – для підтримання оптимального теплового режиму, що особливо важливо у період літнього навантаження;

- Металеві шафи для встановлення – чотири розмірами 1000×2000×600 мм.

2.2. Оцінка сумісності обладнання. Необхідно врахувати сумісність обладнання між собою, відповідність технічним умовам об'єкта, а також температурну стійкість, пило- та вологозахист (рекомендовано клас захисту IP  $\geq 31$  для внутрішнього монтажу).

2.3. Планування поставок. Доцільно погодити з постачальником можливість поступової поставки обладнання для паралельного виконання монтажних і пусконаладжувальних робіт.

### 3. Монтаж та введення в експлуатацію

3.1. Монтаж обладнання. Роботи з монтажу слід виконувати ліцензованою електромонтажною організацією. Основні вимоги:

- правильне підключення фаз та нейтралі;
- наявність окремих автоматичних вимикачів для кожного ступеня;
- встановлення аварійної сигналізації (світлова індикація перегріву, несправності ступенів);

- правильне розташування вентиляційних отворів, уникнення перегріву.

3.2. Пусконаладжувальні роботи. Цей етап передбачає:

- тестування кожного ступеня конденсаторної установки;
- перевірку роботи регуляторів реактивної потужності;
- програмування логіки вмикання ступенів відповідно до навантаження;
- перевірку ефективності вентиляції та спрацювання термореле при досягненні порогової температури.

3.3. Контроль результатів. Після запуску потрібно заміряти фактичний  $\cos\varphi$  у пікові години навантаження, оцінити зниження рівня реактивної енергії та переконатися у дотриманні нормативних меж.

### 4. Експлуатація та технічне обслуговування

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1. Режим контролю. СКРП повинна бути обладнана засобами дистанційного або локального моніторингу (через PFC-контролер), що дозволяє:

- виявляти збої в роботі ступенів;
- фіксувати перегрів;
- отримувати попередження про зниження ефективності компенсації.

4.2. Планове технічне обслуговування. Рекомендується проводити раз на 6 місяців і включати:

- візуальну перевірку контактів, шлейфів та запобіжників;
- замір температури під час роботи (за допомогою інфрачервоного термометра);
- прочистку вентиляційної системи та фільтрів;
- оцінку залишкової ємності конденсаторів (у разі підозри на деградацію).

4.3. Оцінка довготривалого ефекту. Щонайменше раз на рік доцільно проводити аналіз споживання реактивної енергії на базі рахунків облenergo або за даними лічильника. Це дозволяє вчасно виявити відхилення та переналаштувати систему за потреби.

## 5. Очікуваний ефект та рекомендації щодо оптимізації витрат

5.1. Економічна ефективність. У випадку типового зернового елеватора з електронавантаженням понад 1 МВт і низьким  $\cos\varphi$  (0,65–0,75) впровадження СКРП дозволить:

- повністю уникнути штрафів за споживання реактивної енергії;
- зменшити загальний струм у мережі підприємства;
- знизити втрати в трансформаторі та кабельних лініях;
- досягти строку окупності капіталовкладень протягом 2 – 3 років (у залежності від тарифів та режиму роботи).

5.2. Рекомендації на майбутнє. Після стабільної роботи СКРП впродовж року доцільно розглянути варіант впровадження системи динамічної

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компенсації (STATCOM) або автоматизованого керування навантаженнями, що підвищить загальну гнучкість електроспоживання підприємства.

### 3.7 Висновки до розділу

Було здійснено комплексне дослідження енергоспоживання зернового елеватора, розташованого в смт Вапнярка Вінницької області, з метою аналізу та компенсації реактивної потужності. Проведений аналіз технологічного процесу та електричних навантажень дозволив сформулювати повне уявлення про структуру електроспоживання та встановити першочергові напрями для енергоефективної модернізації системи електропостачання.

На основі розрахунків визначено:

- загальна встановлена потужність електроспоживачів складає 4893,42 кВт,
- активна розрахункова потужність – 3493,48 кВт,
- повна потужність – 4355,66 кВА,
- реактивна потужність – 2602,22 кВАр, що вказує на надмірну індуктивність навантаження та потребу у заходах компенсації.

У роботі було запропоновано практичне технічне рішення: розробка системи компенсації реактивної потужності на основі автоматизованої батареї статичних конденсаторів (БСК). Така установка передбачає:

- використання багатоступеневої конденсаторної батареї із автоматичним регулюванням залежно від поточного навантаження;
- розміщення установки в головному розподільчому щиті, що забезпечує централізовану компенсацію;
- застосування контролера коефіцієнта потужності, який у реальному часі аналізує параметри електромережі та підключає/відключає ступені батареї;

						Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вибір номінальної потужності БСК на рівні приблизно 1500 кВАр, що дозволяє довести коефіцієнт потужності до нормативного значення 0,95 – 0,99.

Також були сформульовані практичні рекомендації з реалізації даного технічного рішення, серед яких:

- доцільність встановлення БСК з урахуванням сезонності роботи елеватора, з можливістю розширення або перепрограмування під різні режими;

- обов'язковість встановлення захисної апаратури (автоматичних вимикачів, плавких вставок, розрядників від перенапруги);

- інтеграція з існуючими системами моніторингу для контролю параметрів електромережі;

- забезпечення належної вентиляції та температурного режиму для стабільної роботи конденсаторів;

- економічне обґрунтування строку окупності інвестицій на основі зниження плати за реактивну енергію та зменшення втрат у мережі.

Таким чином, проведено теоретичний аналіз проблеми, а також розроблено конкретний техніко-економічно обґрунтований проєкт системи компенсації, що має високу прикладну цінність для практичного впровадження на елеваторному підприємстві.

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи проведено всебічне техніко-економічне дослідження питань, пов'язаних із компенсацією реактивної потужності в системі електропостачання зернового елеватора, що є надзвичайно актуальним для підвищення енергоефективності об'єктів агропромислового комплексу.

Мета дослідження полягала у розробці ефективного технічного рішення з компенсації реактивної потужності для зернового елеватора з метою зменшення втрат електроенергії, зниження фінансових витрат на оплату спожитої електроенергії, підвищення коефіцієнта потужності та забезпечення стабільної роботи електротехнічного обладнання.

Для досягнення цієї мети було виконано ряд послідовних етапів:

1. Проаналізовано технологічний процес функціонування зернового елеватора, визначено його структурні складові, особливості технології зберігання, сушіння, очищення та транспортування зерна. Особливу увагу приділено технологічному обладнанню, яке є основним джерелом споживання електроенергії.

2. Складено перелік основних електроспоживачів елеватора, з урахуванням їх призначення, встановленої потужності, режимів роботи, а також розраховано коефіцієнти попиту і коефіцієнти потужності. В результаті визначено сумарну встановлену потужність на рівні 4893,42 кВт, а розрахункову активну потужність у максимумі навантаження — 3493,48 кВт.

3. Визначено повну потужність елеватора — 4355,66 кВА, що дозволило розрахувати величину реактивної складової, яка становить 2602,22 кВАр, тобто понад 37% від повної потужності. Такий рівень реактивної потужності свідчить про суттєве індуктивне навантаження, яке негативно впливає на параметри електропостачання.

						Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Проведено оцінку впливу реактивної потужності на функціонування системи електропостачання елеватора. З'ясовано, що наявність надлишкової реактивної потужності спричиняє:

- падіння напруги в мережі;
- зниження надійності роботи електродвигунів;
- збільшення втрат активної енергії у мережах і трансформаторах;
- зменшення допустимого навантаження на трансформатори;
- можливі збої в роботі обладнання під час запуску потужних механізмів.

5. Проаналізовано методи компенсації реактивної потужності — індивідуальну, групову та централізовану. Розглянуто типи компенсуючих пристроїв: батареї конденсаторів, синхронні компенсатори, тиристорні регулятори, фільтрокомпенсуючі установки. На основі порівняння техніко-економічних характеристик зроблено висновок, що найбільш доцільним варіантом для даного об'єкта є централізована компенсація на базі автоматизованої батареї статичних конденсаторів (БСК).

6. Розроблено технічне рішення з компенсації реактивної потужності. Запропоновано використати багатоступеневу БСК з автоматичним регулюванням потужності, що дозволяє:

- підтримувати коефіцієнт потужності на рівні не нижче 0,95–0,99;
- уникати перекомпенсації або недокомпенсації;
- зменшити навантаження на джерела живлення;
- знизити витрати на оплату електроенергії та підвищити стабільність роботи мережі.

7. Сформовано практичні рекомендації щодо реалізації запропонованої системи компенсації:

- оптимальне місце встановлення БСК — електрощитова;
- обов'язкова наявність автоматичного контролера для динамічного регулювання;

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- врахування сезонності навантаження елеватора при налаштуванні режимів;

- інтеграція БСК з системою моніторингу параметрів енергоспоживання;

- забезпечення захисту обладнання (вимикачі, ПЗВ).

Загальні результати роботи:

- розроблено обґрунтовану схему енергозабезпечення з компенсацією реактивної потужності;

- показано, що впровадження БСК дозволяє зменшити витрати електроенергії, збільшити ресурс обладнання та уникнути фінансових штрафів;

- продемонстровано, що компенсація реактивної потужності є важливим заходом як з технічної, так і з економічної точки зору.

Запропоновані рішення мають прикладне значення і можуть бути адаптовані для інших елеваторів та енергоємних підприємств.

Таким чином, поставлена в роботі мета досягнута повністю, усі задачі виконано, а розроблене рішення може бути успішно впроваджене на практиці.

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Перелік джерел посилання

1. Електронний ресурс: <https://elevator.com.ua/blog/yak-pratsyuye-elevator-rozuminnya-protsesu> – Як працює елеватор. Розуміння процесу. – Мова: укр.
2. Фоміна І. М., Гавриш Т. В., Шаніна О. М., Боровікова Н.О. Технологічне проектування елеваторів та комбікормових підприємств: навчальний посібник до виконання бакалаврських робіт – Х.: ДБТУ, 2024. – 140 с.
3. Електронний ресурс: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88366](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88366). – ВНТП 05-88 Норми технологічного проектування хлібоприймальних підприємств і елеваторів. – Мова: рос.
4. Решетник В., Вакуленко О.; Коркулов В. Схемо-технічні рішення покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». – Тернопіль, 2018. – С. 272 – 273.
5. Закладний О. М., Закладний О. О., Оборонов Т. Ю. Вплив якості напруги живлення на електроприводи з синхронними двигунами // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2012. – Вип. 22. – С. 180–188.
6. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії: підручник // Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.
7. Зорін В.В., Тисленко В.В. Системи електропостачання загального призначення: навч. посібник. – Чернігів, 2005. – 341 с.
8. Маліновський А. А., Хохулін Б. К. Основи електропостачання : навч. посіб. // Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005. – 324 с.
9. Електронний ресурс: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/786f01f9-0b4c-476a-9cdf-638dc5632280/content> – Мережі постійного і змінного струму з альтернативними джерелами енергії – 2: Конспект лекцій: навч. посіб.

						Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Є.В. Вербицький–Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 96 с.

10. Данильченко Д. О., Кузнецов Д. С. Використання пристроїв компенсації реактивної потужності при впровадженні розподіленої генерації // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2024. – № 1 (8). – С. 24-31.

11. Курашкін С. Ф., Попова І. О. Механізм пошкодження елементів конструкції силового трансформатора. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. – Харків, 2017. – Вип. 186: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – С. 62-63.

12. Попова І. О., Курчанов А. А. Порівняння і аналіз пристроїв компенсації реактивної потужності в електричних мережах. – сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції пам'яті В. В. Овчарова 04 – 18 листопада 2021 року. – Мелітополь, 2021. – С. 17 – 18.

13. Овчаров В. В. Теоретические основы электротехники: учебное пособие. Ч. 1. – Мелітополь: Люкс, 2007. – 389 с.

14. Терешкевич Л. Б., Червінська Т. М. Аналіз впливу батарей статичних конденсаторів на роботу системи електропостачання з несиметричною напругою // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – С. 39 – 43.

15. Плугін Д. С., Чепелюк О. О. Функціональні особливості контролерів компенсації реактивної потужності для мереж низької напруги // Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA'2024): матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 24–25 жовтня 2024 р.) / НТУ «ХПІ». – Харків, 2024. – С. 39.

16. Кучеренко Д., Сіріков О. Проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах з нелінійним навантаженням // Автоматика,

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2022): Матеріали міжнародної науковотехнічної конференції. – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2022. – С. 100.

17. Курчанов А.А., Макенов П.С. Застосування компенсації реактивної потужності в сільських електричних мережах // ІХ Всеукраїнська науково-технічна конференція магістрантів і студентів ТДАТУ: матеріали ІХ Всеукр. наук.-техн. конф., 26 - 30 квітня 2021 р. – Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – С.81

18. Електронний ресурс: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=106226](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226) – ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). – Мова: англ.

19. Електронний ресурс: <https://www.eti.ua/pidtrymka/konfihuratori-ta-dodatky/online-konfihurator-komplektuyuchykh-ustanovky-krp> – Online конфігуратор комплектуючих установки КРП. – Мова: укр.

20. Електронний ресурс: <https://cp.eti-support.eu/CP/Index> - Конфігуратор установок КРП. – Мова: укр.

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		