

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
Факультет енергетики і комп'ютерних технологій

«На правах рукопису»
УДК 621.3

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електроенергетики
та електротехнологій

к.т.н., доц. _____

« 12 » _____ 02 2026 року

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в
мережі промислового підприємства»

21ЕЕД.11960498.02.26.000000ПЗ

Виконав: студент М2 курсу, 22 МБ ЕЕ групи
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка
Освітня програма : Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

_____ Д. Є. Олійник
(підпис)

Керівник, к.т.н, доцент _____ О. І. Коваленко
(підпис)

Консультант, к.е.н., доцент _____
(підпис)

Нормоконтролер, к.т.н., доц. _____
(підпис)

Рецензент _____
(підпис)

Запоріжжя, 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Факультет енергетики і комп'ютерних технологій
Кафедра електроенергетики і електротехнологій
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електроенергетики і
електротехнологій к.т.н.,
доц. _____ « 27 » 12
2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Олійнику Дмитру Євгеновичу

1. Тема роботи: Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в мережі промислового підприємства

керівник роботи: Коваленко О. І., к.т.н., доцент.

затверджені наказом ректора університету від 29 вересня 2025 року № 521-С.

2. Строк подання здобувачем роботи: 11 лютого 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи: електричні та статичні дані промислового підприємства, завдання на кваліфікаційну роботу, матеріали виробничих та переддипломних практик, нормативні документи, електронні ресурси, науково-технічна література, та ін.

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

Вступ.

1. Аналіз ефективності споживання енергетичних ресурсів підприємством.

2. Аналіз схеми електропостачання підприємства.

3. Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в електричній мережі підприємства.

4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження заходів з удосконалення системи компенсації реактивної потужності.

Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

1. Обсяги споживання енергетичних ресурсів підприємством. Плакат навчально-технічний.
2. Схема електропостачання підприємства. Схема електрична принципова.
3. Класифікація способів і засобів регулювання напруги в електричних мережах. Плакат навчально-технічний.
4. Схема живлення півної секції №5 цеху №4. Схема електрична принципова.
5. Розміщення конденсаторних установок в системі електропостачання підприємства. Схема електрична принципова.
6. Схеми пристроїв компенсації реактивної потужності. Схема електрична принципова.
7. Схема регульованого джерела реактивної потужності. Схема електрична принципова.

6. Консультанти розділів (підрозділів) роботи

Розділ (підрозділ)	П.І.Б, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4		27.12.25	27.12.25

7. Дата видачі завдання: 27 грудня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз ефективності споживання енергетичних ресурсів підприємством.	02.01.2026 р.	
2. Аналіз схеми електропостачання підприємства.	19.01.2026 р.	
3. Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в електричній мережі підприємства.	31.01.2026 р.	
4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження заходів з удосконалення системи компенсації реактивної потужності.	09.02.2026 р.	
5. Підпис керівником роботи.	11.02.2026 р.	
6. Підпис завідувачем кафедри.	12.02.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)
Керівник роботи, к.т.н., доцент _____
(підпис)

Д. Є. Олійник
О. І. Коваленко

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. арк.	№ примір.	Примітка
1	A4	21ЕЕД.11960498.02.26.000000ПЗ	Удосконалення системи	1		
2			компенсації реактивної			
3			потужності в мережі			
4			промислового підприємства	100	–	
6	A1	21ЕЕД.11960498.02.26.110000УП	Обсяги споживання			
7			енергетичних ресурсів			
8			підприємством. Плакат			
9			навчально-технічний.	1	–	
10	A2	21ЕЕД.11960498.02.26.210000ЭЗ	Схема електропостачання			
11			підприємства. Схема			
12			електрична принципова.	1	–	
13	A1	21ЕЕД.11960498.02.26.220000УП	Класифікація способів і			
14			засобів регулювання			
15			напруги в електричних			
16			мережах. Плакат навчально-			
17			технічний.	1	–	
18	A2	21ЕЕД.11960498.02.26.230000ЭЗ	Схема живлення пічної			
19			секції №5 цеху №4. Схема			
20			електрична принципова.	1	–	
21	A2	21ЕЕД.11960498.02.26.310000ЭЗ	Розміщення конденсаторних			
22			установок в системі			
23			електропостачання			
24			підприємства. Схема			
25			електрична принципова.	1	–	
				21ЕЕД.11960498.02.26.000000ПЗ		
Зм.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		
Розроб.		Олійник Д. Є.		10.02.26	Літ.	Аркуш
Перев.		Коваленко О.І.		11.02.26		Аркушів
Н.контр.				11.02.26	ТДАТУ, 2026	
Затв.				12.02.26		
Відомість технічного проєкту					1	2

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. арк.	№ примір.	Примітка
1	A1	21ЕЕД.11960498.02.26.320000ЭЗ	Схеми пристроїв компенсації			
2			реактивної потужності.			
3			Схема електрична			
4			принципова.	1	–	
5	A2	21ЕЕД.11960498.02.26.330000ЭЗ	Схема регульованого			
6			джерела реактивної			
7			потужності. Схема електрична			
8			принципова.	1	–	
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
						Арк.
						2
Зм.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	

РЕФЕРАТ

Олійник Д. Є. Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в мережі промислового підприємства : кваліфікаційна. Запоріжжя : ТДАТУ, 2026 рік. 100 с.

Обсяг кваліфікаційної роботи – 100 аркушів, кількість рисунків – 26, кількість таблиць – 8.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано структуру та обсяги споживання енергетичних ресурсів промисловим підприємством. Виконано аналіз споживання електричної енергії технологічним обладнанням виробничих цехів підприємства. Встановлено, що найбільші обсяги споживання має цех № 4.

Аналіз схеми електропостачання підприємства та цеху показав, що в цеху застосовується обладнання та схеми компенсації реактивної потужності, що обумовлено технологічним процесом – наявністю електротехнологічного обладнання із високим реактивним опором, що змінюється в часі. Це обладнання має суттєвий недолік – ручне регулювання реактивної потужності.

Досліджено існуючі схеми компенсації реактивної потужності на базі конденсаторних установок та статичних тиристорних компенсаторів, виявлено їх слабкі місця та переваги. Запропоновано комбінування відомих схем із використанням якомога більшої кількості переваг кожної із них. До впровадження в цеху пропонується розроблена за цим принципом схема із застосуванням регульованого джерела реактивної потужності.

У кваліфікаційній роботі також проведено техніко-економічні розрахунки щодо ефективності удосконалення системи компенсації реактивної потужності.

Ключові слова : ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ, ДЖЕРЕЛО РЕГУЛЬОВАНОЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Oliinyk D. Improvement of the reactive power compensation system in the network of an industrial enterprise: qualification thesis. Zaporizhzhia: TSATU, 2026. 100 pages.

The total volume of the qualification thesis is 100 pages, number of figures – 26, number of tables – 8.

In the qualification thesis, the structure and volumes of energy resource consumption by an industrial enterprise were analyzed. An analysis of electrical energy consumption by technological equipment of the enterprise's production workshops was carried out. It was determined that Department No. 4 has the highest consumption.

The analysis of the enterprise and workshop power supply scheme showed that the workshop uses equipment and reactive power compensation schemes determined by the technological process, namely the presence of electrotechnological equipment with high reactive impedance that changes over time. This equipment has a significant drawback – manual regulation of reactive power.

Existing reactive power compensation schemes based on capacitor banks and static thyristor compensators were studied, and their advantages and weaknesses were identified. A combination of known schemes was proposed using the maximum possible advantages of each of them. For implementation in the workshop, a scheme developed according to this principle using a controlled reactive power source is proposed.

The qualification thesis also includes technical and economic calculations regarding the efficiency of improving the reactive power compensation system.

Keywords: ELECTRICAL ENERGY, REACTIVE POWER, REACTIVE POWER COMPENSATION, POWER FACTOR, CONTROLLED REACTIVE POWER SOURCE.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВОМ.....	13
1.1 Загальна характеристика підприємства	13
1.2 Аналіз енергоспоживання підприємства	15
Висновки до розділу 1.....	23
2 АНАЛІЗ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА..	24
2.1 Аналіз факторів, що впливають на якість електричної енергії в мережі підприємства	24
2.2 Рівні напруги в системі електропостачання підприємства	30
2.3 Аналіз системи електропостачання печей графітації цеху №4.	43
Висновки до розділу 2	54
3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА	55
3.1 Джерела реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств	55
3.2 Аналіз схем пристроїв компенсації реактивної потужності	69
3.3 Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в мережі цеху графітації №4.....	77
3.3.1 Компенсація реактивної потужності печей графітації.....	77
3.3.2 Модернізація схеми компенсації реактивної потужності цеху.....	80
3.3.3 Система керування вентильними перетворювачами в схемі регульованого джерела реактивної потужності	83
Висновки до розділу 3	88

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	90
4.1 Розрахунок економічної ефективності від використання нерегульованого пристрою компенсації реактивної потужності	90
4.2 Розрахунок економічної ефективності від використання регульованого джерела реактивної потужності	92
Висновки до розділу 4	94
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	98

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

На даний час електрична енергія використовується в переважній більшості технологічних процесів на промислових підприємствах та задовольняє усі першочергові потреби населення. Так, до прикладу, у 2021 році було спожито електричної енергії бруто (із втратами та витратами на власні потреби станцій і підстанцій) 155 млрд. кВт год, а нетто – 126 млрд. кВт год.

До основних споживачів електричної енергії в Україні можна віднести: промислові підприємства – до 41,7 % споживання від загального обсягу; населення до 31 %; комунальне побутове господарство – до 12 % [1].

Наведені дані вказують, що майже половина 41,7 % виробленої електричної енергії в Україні припадає на галузі промисловості.

Також необхідно відмітити, що втрачено в електричних мережах різного призначення і різних класів напруги близько 29,3 млрд. кВт год – 19% [2, 3].

Під час воєнних дій в Україні пошкоджено значну частину потужностей генерації. Наряду із недостатнім обсягом генерації електричної енергії залишаються актуальними давно відомі проблеми її втрат та нераціонального використання в електричних мережах промислових підприємств, як найбільших її споживачів. Питання зменшення втрат в електричних мережах систем електропостачання промислових підприємств є актуальними.

Сучасні умови функціонування промислового підприємства висувають вимоги раціонального використання електричної енергії. Велику долю навантаження на мережу підприємств мають реактивні навантаження (електродвигуни, трансформатори, електромагніти, печі). Надлишкове споживання реактивної потужності з мережі приводить до втрат електроенергії, збільшення величини струму, зниження напруги в споживачів. В перспективі це приводить до зниження надійності електрообладнання і підвищення вартості продукції.

Актуальність теми. Серед напрямів підвищення ефективності енергоспоживання промислових підприємств є застосування систем

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компенсації реактивної потужності як на головних підстанціях підприємств, так і в електричних мережах окремих цехів.

Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання є досить ефективним заходом, який знижує витрату електроенергії на її передачу, знижує потоки реактивної потужності (розвантажує мережі), поліпшує показники якості напруги і знижує витрати на обладнання електричних мереж [4, 5].

Питання компенсації реактивної потужності актуальні для електричних мереж різних класів напруги та різного призначення. Ці питання є актуальними і для систем електропостачання промислових підприємств в комплексі із одночасним підвищенням якості електричної енергії.

В даний час в системах електропостачання промислових підприємств застосовують або нерегульовані пристрої компенсації, або прості пристрої та схеми компенсації із ступінчастим регулюванням реактивної потужності. Застосування таких пристроїв дещо дозволяє отримати певне підвищення їх енергоефективності, але воно не дозволяє отримати максимального ефекту від компенсації реактивної потужності при витраті значних фінансових ресурсів на їх впровадження [4, 5].

Із наведеного вище слідує, що дослідження напрямів удосконалення систем компенсації реактивної потужності шляхом застосування регульованих джерел реактивної потужності і їх схем підключення та режимів роботи в системах електропостачання промислових підприємств є актуальними і мають перспективу практичного застосування.

Мета і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення системи компенсації промислового підприємства шляхом впровадження ефективних схем компенсації, що мають у своєму складі регульовані джерела реактивної потужності із високою дискретністю регулювання.

Для досягнення вказаної мети в кваліфікаційній роботі поставлені наступні задачі:

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- проаналізувати структуру та обсяги споживання енергетичних ресурсів на промисловому підприємстві;
- проаналізувати обсяги споживання електричної енергії цехами підприємства з метою визначення ділянок, що мають значні обсяги та низьку ефективність електроспоживання;
- виконати аналіз схеми електропостачання підприємства, виробничих цехів та прийнятих схем компенсації реактивної потужності;
- дослідити фактори, що впливають на показники якості електричної енергії в мережі підприємства і шляхи їх покращення;
- дослідити обладнання та схеми пристроїв компенсації реактивної потужності на предмет їх удосконалення з метою підвищення ефективності споживання електричної енергії;
- обґрунтувати удосконалення системи компенсації реактивної потужності в електричній мережі підприємства та запропонувати схеми із регульованим джерелом реактивної потужності;
- виконати розрахунки техніко-економічної ефективності від впровадження запропонованих заходів.

Об'єкт дослідження: система електропостачання промислового підприємства.

Предмет дослідження: процес компенсації реактивної потужності в електричній мережі підприємства.

Методи досліджень. При виконанні роботи використовувалось теоретичні і експериментальні методи, зокрема, методи аналізу обсягів та режимів споживання електроенергії; структурний аналіз способів та схем компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, оцінка техніко економічної ефективності прийнятих технічних рішень.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						12
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВОМ

1.1 Загальна характеристика підприємства

У кваліфікаційній магістерській роботі пропонується в якості промислового підприємства розглянути потужне підприємство України – ПрАТ «Укрграфіт», що розташоване у місті Запоріжжі.

ПрАТ «Укрграфіт» є провідним виробником вуглеграфітової продукції в Україні. Цей завод призначений для виробництва графітованих електродів для електросталеплавильних, руднотермічних та інших видів електричних печей, товарних вуглецевих мас і електродів Содерберга, футерованих матеріалів на основі вуглецю для підприємств металургійного, машинобудівного, хімічного та інших комплексів промисловості [6].

Підприємство традиційно одним з перших здійснювало розробку і впроваджувало у виробництво нові види технологій, сучасні агрегати і технологічні лінії. Багато зроблено за останні роки. У 2000 році на підприємстві введено в промислову експлуатацію нового цеху вугільних заготовок, що не має аналогів у країнах Східної Європи [6].

У 2001 році впроваджена технологія виробництва графітованих блоків для виготовлення анодів магнієвих електролізерів, що відрізняються зниженим питомим електричним опором і підвищеною експлуатаційною стійкістю, побудовано цех і освоєно виробництво анодів для магнієвої промисловості з просоченнями неорганічними компаундами на основі фосфорних сполук [6, 7].

У 2003-2004 роках на підприємстві освоєне виробництво маси холодної набивки, вуглецевої теплопровідної маси для доменних печей і маси холодної подової набивки для алюмінієвих електролізерів.

Продукція, що виготовляється на підприємстві і її призначення наведені в таблиці 1.1 [6].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Основні види продукція ПрАТ «Укрграфіт»

Назва продукції	Призначення
Електроди графітовані і ніпелі	Для електродугових, сталеплавильних, феросплавних, руднотермічних печей і інших електротермічних пристроїв
Блоки графітовані	Для кладки поду доменних печей і футеровки інших типів промислових печей
Аноди і бруси графітовані	Для виготовлення і застосування в якості анодів магнієвих електролізерів
Блоки вуглецеві	Для футеровки поду, горна і нижньої частини шахти доменної печі, для футеровки печей для електротермічних і хімічних процесів
Маса вуглецева: тверда, пастоподібна, холоднонабивна	Для заповнення швів між блоками вуглецевої футеровки металургійних і інших типів промислових печей
Блоки подові	Для футеровки подини алюмінієвих електролізерів
Блоки бокові	Для бокової футеровки алюмінієвих електролізерів
Маса холоднонабивна подова	Для заповнення швів у футеровці алюмінієвих електролізерів
Маса анодна	Використовується в безперервних самовипалювальних анодах
Маса електродна	Для формування безперервних самовипалювальних електродів

Сьогодні виробнича марка ПрАТ «Укрграфіт» і продукція підприємства визнана споживачами, українськими і міжнародними організаціями. За асортиментом і якістю своєї продукції ПрАТ «Укрграфіт» утримує ведучі позиції серед виробників аналогічної вуглеграфітової продукції в усьому світі [6].

На території підприємства розташовано 5 основних цехів, які безпосередньо виробляють випуск готової продукції:

- цех вугільних заготовок №1;
- змішувально-пресовий цех №2;
- цех випалу №3;
- цех графітації №4;
- цех механічної обробки електродів №5.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До допоміжних цехів відносяться: цех №6, у якому виробництво розподіляється по трьом ділянкам; тарний цех №7; компресорний цех №8; цех електропостачання, автоматизації та ремонту технологічного обладнання №9; водооборотний цех №10.

1.2 Аналіз енергоспоживання підприємства

На даний час, в умовах зростання тарифів на електроенергію, дедалі більшої актуальності набуває питання економії та раціонального використання електричної енергії, впровадження сучасних енергозберігаючих заходів на виробничих підприємствах. При цьому слід чітко усвідомлювати, що енергозбереження передбачає не обмеження в споживанні електроенергії, а шлях раціонального використання її, отримання більшого обсягу корисної роботи електричного обладнання за рахунок тієї ж кількості спожитої електроенергії за ті ж самі кошти.

Промислове обладнання не завжди раціональне у витратах електричної енергії, так як не дозволяє виконувати енергозбереження на підприємстві в різних виробничих режимах, в тому числі і таких, коли електроенергія практично витрачається марно.

Сучасні потужні виробничі компанії, які щомісяця споживають 5-10 мільйонів кВт/год зацікавлені в тому, щоб економія електроенергії здійснювалася на найвищому рівні. Це необхідно з багатьох причин, але найголовніша причина полягає в економії коштів на оплату електроенергії, що дуже актуально в наш час, коли ціна на неї регулярно зростає. На даний час ще однією суттєвою причиною, що спонукає зменшення обсягів споживання електричної енергії є обмежений ресурс електрогенеруючих потужностей в Україні, що пов'язано із воєнними діями.

Сьогодні проблему обмеженого надходження електричної енергії можна вирішити шляхом впровадження абсолютно нового рівня споживання

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

електроенергії, завдяки цьому економія електроенергії на підприємстві стане реальною [8, 9].

Варто зауважити, що енергозбереження на підприємстві може бути досягнуто шляхом:

- застосування нових технологій і систем для енергозабезпечення виробничого процесу;
- впровадження нових технологій виробництва продукції;
- впровадження у виробництво більш досконалого технологічного обладнання;
- підвищення можливостей експлуатації і технічного обслуговування виробничого обладнання;
- зменшення втрат електричної енергії в системі електропостачання підприємства;
- раціонального використання енергосистеми в години максимальних і мінімальних навантажень в енергосистемі.

Для вирішення означеної проблеми головний інструмент – вести прозорий та якісний облік спожитої електроенергії. Завдяки обліку споживаної енергії підприємства можна оптимізувати виробництво, виключити нецільове використання електроенергії, прогнозувати витрати і аналізувати енергоємність окремих об'єктів, що призведе до значної економії електроенергії і, як наслідок, грошових коштів.

Окрім кількості споживаної електричної енергії також в останні роки постає питання її якості. Якість споживаної електроенергії стає важливим моментом роботи електро- та технологічного устаткування заводу. Економія електроенергії на підприємстві без застосування засобів і обладнання, які забезпечують подачу електроенергії на виробниче обладнання стабільною і якісною, неможлива. Ефект від його роботи, а з ним і можливості будь-якої промислової компанії стають максимальними.

Досить скористатися принципом раціонального енергозбереження, прагнути допомогти промислому підприємству вийти на новий рівень

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоспоживання, економити на витратах електроенергії за допомогою сучасного енергозберігаючого та облікового обладнання [9].

Енергетичний аудит підприємства є першим кроком на шляху впровадження енергозберігаючих проектів та контролю витрат енергії на підприємстві.

Енергетичний аудит (енергетичне обстеження об'єкту) виконується з метою визначення проблемних ділянок з точки зору електроспоживання, можливості економії енергетичних ресурсів, здійснення заходів з економії шляхом упровадження механізмів енергетичної ефективності, а також з метою впровадження на підприємстві системи енергетичного менеджменту [9].

Енергетичний аудит дозволяє визначити наскільки ефективно використовуються паливно-енергетичні ресурси та розробити рекомендації для скорочення їх споживання [9].

Для отримання суттєвого економічного ефекту, перш за все необхідно знизити витрати на найбільш енергоємних підрозділах (ділянках, цехах) підприємства. Для цього необхідно обстежити все підприємство та визначити який вид енергоресурсу є найбільш споживаним.

Основними енергоресурсами на підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» є: електрична енергія, водяна пара та природний газ. У таблиці 1.2 представлені обсяги споживання різних енергоресурсів за 2019-2020 роки [6].

Таблиця 1.2 – Обсяги споживання енергоресурсів

Вид енергоресурсу	Рік		
	2019	2020	2021
Водяна пара, МВт·год	58 162,79	58 802,44	53 817,83
Природний газ, МВт·год	109 776,62	152 601,46	149 594,49
Електроенергія, МВт·год	142 979,85	198 298,23	245 174,18

За таблицею 1.2 видно, що споживання будь-якого енергоресурсу не є стабільним. Це все обумовлено тим, що кожного року на підприємстві випускається різна кількість продукції.

За даними таблиці 1.2 на рисунку 1.2 наводимо гістограму споживання енергоресурсів на підприємстві «Укрграфіт».

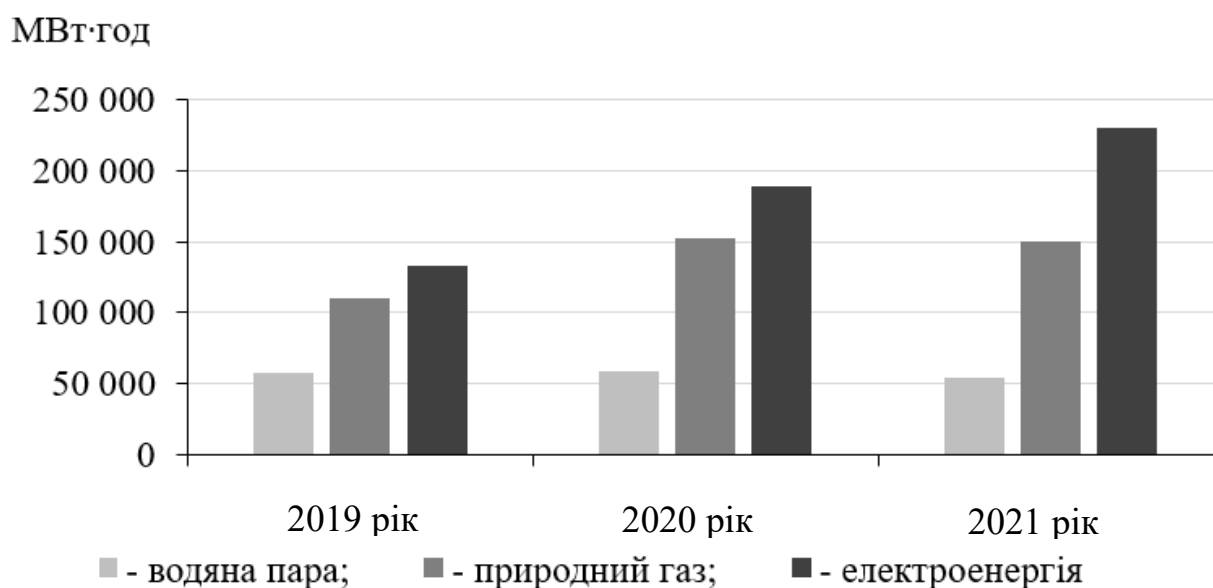


Рисунок 1.2 – Обсяги споживання енергоресурсів

З гістограми видно, що найбільш енергоресурсом, що споживається на підприємстві, є електрична енергія. Для того, щоб знизити витрати підприємства на електричну енергію, необхідно побудувати баланс її річного споживання за структурними підрозділами (цехами) (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Споживання електроенергії структурними підрозділами

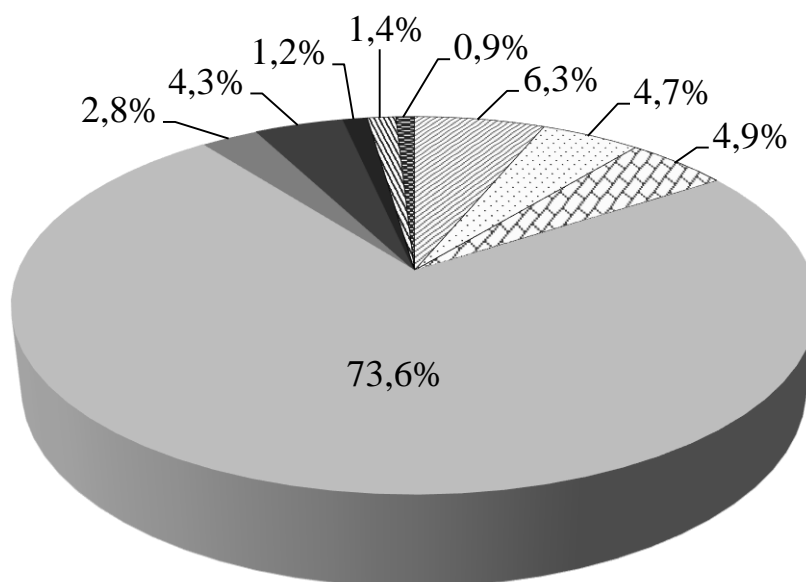
Підрозділ	Обсяг споживання електроенергії, МВт·год		
	2019 рік	2020 рік	2021 рік
Цех №1	9 614,99	18 297,61	16 419,45
Цех №2	10 316,88	14 185,48	12 926,75
Цех №3	6 424,96	9 643,08	13 214,98
Цех №4	93 397,47	129 654,55	175 459,94
Цех №5	5 211,32	6 733,64	7 422,49
Цех №8	8 934,15	9 478,35	10 843,59
Опалення	3 533,56	3 742,16	3 708,39
Інші споживачі	4 213,62	3 235,74	4 122,65
Втрати в мережі	1 331,84	2 326,86	2 054,14
Разом	142 979,85	198 298,23	245 174,18

Це дасть можливість виявити найбільш енергоємні ділянки, в яких буде доцільним впровадження енергозберігаючих заходів.

Для спрощення аналізу допоміжні підрозділи з відносно малим споживанням електричної енергії були об'єднані в групу «Інші споживачі».

Споживання електричної енергії підрозділами підприємства дуже різниться, так як кожний підрозділ має свою специфіку технологічного процесу в яких використовується різне обладнання, що зумовлює різні обсяги споживання електричної енергії.

На рисунку 1.3 представлено візуалізовану інформацію про споживання електричної енергії підрозділами у відсотковому співвідношенні за даними 2021 року (стан передвоєнний).



- ▨ - цех №1 □ - цех №2 ▩ - цех №3 ■ - цех №4 ■ - цех №5
- - цех №8 ■ - опалення ▨ - інше ▩ - втрати

Рисунок 1.3 – Споживання електроенергії цехами підприємства за 2021 рік

Проведений аналіз електроспоживання на підприємстві показав, що найбільше електричної енергії споживає цех графітації №4 (73,6% від загального електроспоживання).

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк. 19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В цьому підрозділі головними споживачами електричної енергії є електричні печі графітації. Вони є найголовнішим обладнанням на підприємстві, так як виконують останній та найвідповідальніший етап виготовлення графітованих електродів – графітацію.

Після виявлення споживача із найбільшим споживанням електроенергії, необхідно визначити як пов'язані обсяги виробництва графітованих заготовок із обсягами споживання електричної енергії.

В таблиці 1.4 відображено обсяги виробництва графітованих електродів та споживання електроенергії. Із таблиці видно, що зміни споживання електричної енергії протягом року пов'язані з попитом на продукцію підприємства при різних обсягах її виробництва [6].

Таблиця 1.4 – Обсяги виробництва графітованих електродів та споживання електроенергії на їх виробництво печами графітації за 2021 рік

Період	Обсяг виробництва, тон	Споживання електроенергії, МВт·год
Січень	1 690,5	11 936,5
Лютий	1 812,6	14 731,3
Березень	2 425,2	15 916,1
Квітень	2 137,0	12 829,4
Травень	2 003,6	14 482,9
Червень	2 008,0	13 834,8
Липень	2 121,4	13 927,2
Серпень	2 211,3	14 495,8
Вересень	2 146,0	14 853,3
Жовтень	2 167,9	14 852,3
Листопад	2 167,0	15 710,7
Грудень	1 805,2	12 398,3
За рік	24 695,7	169 459,91

Згідно наведеної інформації (таблиця 1.4) на виробництво 1 тони графітованих електродів питомі витрати електроенергії у середньому складають 6,5 МВт·год.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для подальшого аналізу необхідним є визначення витрат на електричну енергію у грошовому еквіваленті. Для цього необхідно враховувати зміни тарифу протягом року згідно постановам Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

Тарифи на електричну енергію для споживачів першого класу напруги за 2021 рік згідно постанов НКРЕКП наведені у таблиці 1.5 [10-12]. Також у таблиці 1.5 наведені витрати на електричну енергію у грошових одиницях.

На рисунку 1.4 зображено залежність витрат на електроенергію від обсягу електроспоживання печей графітації.

Таблиця 1.5 – Витрати на споживану електроенергію печами графітації за 2021 рік у грошових одиницях.

Період	Електрична енергія, МВт·год	Тариф, грн/МВт·год	Витрати на електричну енергію, тис. грн
Січень	11 936,5	1 762,6	21039,3
Лютий	14 731,3	1 808,0	26634,2
Березень	15 916,1	1 765,0	28091,9
Квітень	12 829,4	1 698,8	21794,6
Травень	14 482,9	1 696,1	24564,5
Червень	13 834,8	1 728,0	23906,5
Липень	13 927,2	1 731,2	24110,8
Серпень	14 495,8	1 754,9	25438,7
Вересень	14 853,3	1 774,6	26358,7
Жовтень	14 852,3	1 800,5	26741,6
Листопад	15 710,7	1 796,1	28218,0
Грудень	12 398,3	1 791,5	22211,6
За рік	169 459,9	-	299110,2

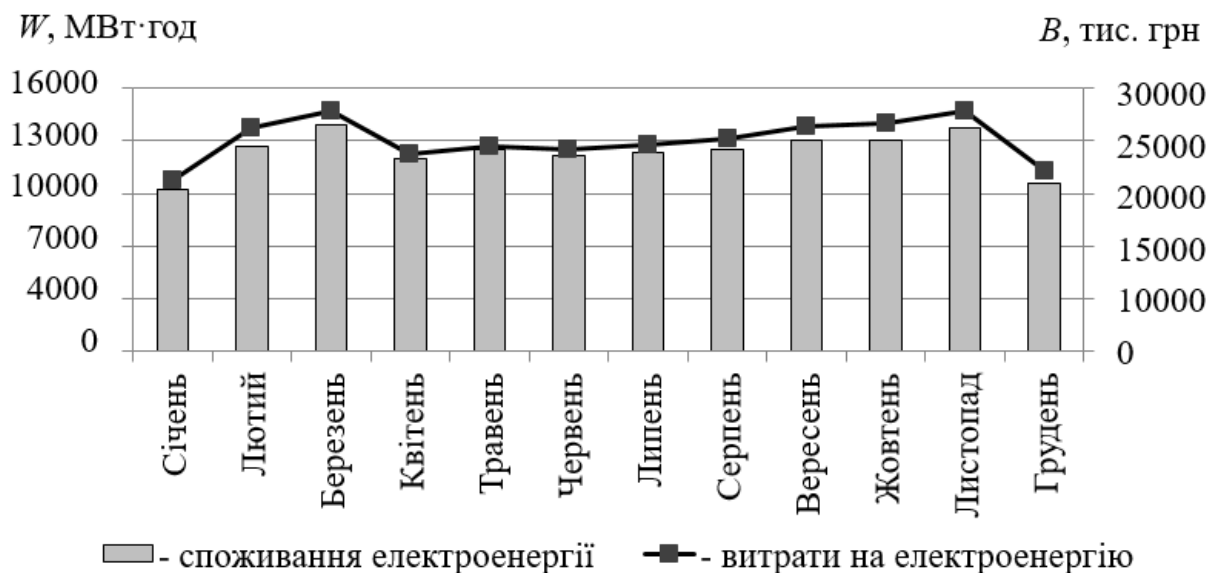


Рисунок 1.4 – Витрати підприємства на електроенергію та обсяг електроспоживання печами графітації

Із таблиці 1.5 видно, що витрати на електричну енергію, що споживається печами графітації, кожного місяця різні, тобто споживання електричної енергії коливається за місяцями, як і тарифи на неї.

На рисунку 1.4 спостерігається залежність витрат підприємства на електричну енергію та її споживання. Також спостерігається нерівномірність споживання електричної енергії протягом року. Причиною цього є різний обсяг виробництва графітованих заготовок, попит на які постійно змінюється.

Витрати електричної енергії печами графітації у 2021 році склали 169,46 ГВт·год, на цю споживану енергію підприємство витратило коштів у розмірі 240,6 млн. грн.

Оскільки за останні роки спостерігається постійне зростання тарифу на електроенергію (особливо у останні роки), а найбільше електроенергії споживають печі графітації, тому впровадження заходів підвищення ефективності електроспоживання саме цього обладнання є економічно доцільним.

Висновки до розділу 1

В результаті виконаного в роботі аналізу споживання енергетичних ресурсів виробничими цехами підприємства ПрАТ «Укрграфіт» встановлено, що найбільшим є рівень споживання електричної енергії. У 2021 році цехами підприємства сумарно спожито 245,2 ГВт год електричної енергії, що становить більше 50 % від загального обсягу спожитих за цей період усіх видів енергетичних ресурсів.

Аналіз споживання електричної енергії технологічним обладнанням виробничих цехів підприємства показав, що найбільший рівень споживання електроенергії припадає на цех графітації №4 – 175,5 ГВт год, що становить близько 73% від загального електроспоживання підприємства. Основна частина електричної енергії в цеху №4 споживається обладнанням печей графітації – 169,5 ГВт год.

Перспективним напрямком досліджень у кваліфікаційній роботі є пошук дієвих шляхів удосконалення елементів системи електропостачання цеху графітації з метою суттєвого зменшення обсягів споживання електричної енергії, зниження енергоємності виробництва та підвищення енергоефективності підприємства в цілому.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Аналіз факторів, що впливають на якість електричної енергії в мережі підприємства

Дотримання встановлених нормативів якості електричної енергії є найважливішим завданням системи електропостачання промислових підприємств. Це завдання ускладнюється в зв'язку із зростанням числа приймачів електроенергії, робота яких впливає на якість електричної енергії.

Якість електричної енергії визначається державним стандартом [13]. Згідно чинного стандарту, до основних показників якості електричної енергії відносяться: усталене відхилення напруги (δU_y), відхилення частоти (Δf), розмах зміни напруги (δU_t), коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю (K_{2U} , K_{0U}), коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги (K_U) [13].

Якість електроенергії оцінюється за техніко-економічними показниками, які враховують збиток, що заподіюється економіці внаслідок псування матеріалів, розлади технологічного процесу, погіршення якості продукції, що випускається, зниження продуктивності праці і з інших причин, так званий технологічний збиток. Крім того, існує і електромагнітний збиток від неякісної електричної енергії, який характеризується збільшенням втрат електроенергії в мережах підприємства, виходом з ладу електротехнічного обладнання, порушенням роботи систем автоматики, телемеханіки та ін.

Порушення показників якості електричної енергії може бути обумовлено як живлячою енергосистемою (мережею), так і приймачами електричної енергії. Особливо це спостерігається при наявності потужних споживачів, як наприклад печі графітації, які працюють на промислових підприємствах, в тому числі і на підприємстві, що розглядається у кваліфікаційній роботі.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частота регулюється на електричних станціях і залежить тільки від їх режимів роботи і загального споживання в електроенергетичній системі.

Коливання напруги, несиметрія і несинусоїдальність напруги викликаються, в основному, роботою окремих електроприймачів на промислових підприємствах. Величина показників якості електроенергії залежить як від потужності живлячої енергосистеми (струмів короткого замикання в даній точці, де оцінюється даний показник), так і від режиму роботи приймачів електричної енергії самого промислового підприємства.

Відхилення напруги залежать як від рівня напруги, що подається енергосистемою на промислове підприємство, так і від роботи окремих, промислових електроприймачів, особливо з великим споживанням реактивної потужності.

Основними особливостями електроенергетичних систем є: практично миттєва передача енергії від джерел до споживачів і неможливість накопичення виробленої електроенергії в значно великій кількості (на даний час). Ці властивості визначають одночасно процес виробництва і споживання електричної енергії.

При передаванні активної P та реактивної Q потужності в системі електропостачання виникають втрати активної потужності, що обумовлені струмом навантаження мережі та параметрами лінії електропередавання, а саме її опором [8, 9]:

$$\Delta P = 3I^2 \cdot r = \frac{S^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2}{U^2} \cdot r + \frac{Q^2}{U^2} \cdot r = \Delta P_a + \Delta P_p, \quad (2.1)$$

де S, P, Q – повна, активна та реактивна потужності;

U – номінальна (лінійна) напруга мережі;

r – активний опір проводів мережі;

$\Delta P_a, \Delta P_p$ – втрати активної і реактивної потужностей, відповідно.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Як видно із виразу (2.1), втрати активної потужності пропорційні квадрату реактивної потужності і при зменшенні втрат реактивної потужності зменшуються втрати активної.

При генерації та споживанні електричної енергії на змінному струмі, кількість виробленої і електричної енергії, що споживається, в кожен момент часу, відповідає кількості переданої і споживаної активної та реактивної потужності, які можуть бути записані у вигляді балансів активної і реактивної потужності [1, 8, 9].

$$\sum P_2 = \sum P_H + \sum \Delta P, \quad (2.2)$$

де $\sum P_2$ – сумарна активна потужність, що генерується на електростанціях;
 $\sum P_H$ та – сумарна активна потужність споживачів;
 $\sum \Delta P$ – сумарні втрати активної потужності в мережах;

$$\sum Q_2 = \sum \Delta Q_H + \sum \Delta Q + \sum Q_{нк} - \sum Q_{нл}, \quad (2.3)$$

де $\sum Q_2$ – сумарна реактивна потужність, що генерується;
 $\sum Q_H$ – сумарна реактивна потужність споживачів;
 $\sum \Delta Q$ – сумарні втрати реактивної потужності в мережах.
 $\sum Q_{нк}$ – сумарна реактивна потужність пристроїв компенсації;
 $\sum Q_{нл}$ – сумарна реактивна потужність, повітряних ліній;

Для будь-якої електричної мережі повинні дотримуватися баланси потужності при дотриманні умов підтримки нормального режиму.

При цьому необхідно забезпечити баланс реактивної потужності як для системи в цілому, так і для окремих вузлів мережі живлення з наявністю в них необхідного резерву реактивної потужності.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Баланс реактивної потужності слід передбачати для кожного характерного режиму електричної мережі окремо. Можна виділити наступні характерні режими функціонування електричної мережі:

– режим максимальних навантажень. Для цього режиму характерні найбільші втрати потужності, енергії та напруги. За результатами розрахунку цього режиму вибираються всі елементи електричної мережі (переріз проводів (кабелів) ліній електропередавання, номінальні потужності силових трансформаторів та ін.);

– режим мінімальних навантажень. В цьому режимі рівні напруги у вузлах мережі різко зростають і з'являється небезпека пошкодження обладнання. Режим розраховується також з метою зниження втрат потужності і енергії, так як можна відключити елементи мережі з малим навантаженням (лінії, трансформатори);

– післяаварійний режим. За результатами розрахунків якого оцінюється перевантажувальна здатність елементів мережі, а також рівні напруги у вузлах мережі.

Для зміни потоків реактивної потужності в мережі промислових підприємствах застосовують батареї статичних конденсаторів.

Поздовжня складова падіння напруги ΔU_m визначається за виразом [14]:

$$\Delta U_m = \frac{P_m \cdot r_m + Q_m \cdot x_m}{U_n}, \quad (2.4)$$

де P_m, Q_m – потоки активної та реактивної потужності в мережі;

r_m, x_m – активний та реактивний опори мережі.

Баланс реактивної потужності визначає рівень напруги у вузлах електричних мереж. Рівень напруги є одним з найважливіших показників режиму роботи електричних мереж та електрообладнання, що до них приєднано.

Значення напруги у вузлах електричної мережі в тій чи іншій мірі відрізняються від середнього рівня, причому ступінь цієї відмінності залежить

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

від конфігурації мережі, величини навантаження та інших факторів (опір проводів опір кабелів, робота пристроїв регулювання напруги на трансформаторах та атоотрансформаторах) що визначають спад напруги.

Величиною напруги на затискачах споживача і швидкістю його зміни визначається якість електричної енергії за цим показником.

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 різниця між дійсним значенням напруги і його номінальним значенням – це відхилення напруги [13].

Цей показник так само має назву усталеного відхилення напруги (δU_y), для якого встановлені нормально і гранично допустимі значення на вводах приймачів електроенергії ($\pm 10\%$ від номінального значення напруги) [13].

Значення усталеного відхилення напруги визначають за формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (2.5)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі;

U_y – дійсна напруга у вузлі мережі.

Зміна сталого відхилення напруги δU_y здійснюється для кожного i -го спостереження за період часу рівний 24 годинам.

Якість електричної енергії за сталим відхиленням напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважають відповідною вимогам, якщо всі виміряні протягом встановленого періоду часу (24 годин) значення усталеного відхилення напруги перебувають в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, і не менше 95% виміряних за той же період часу значень знаходяться в інтервалі, обмеженому нормально допустимими значеннями.

При відхиленні фактичного значення напруги на виводах приймача електроенергії від номінального, його робота погіршується [1, 8, 9, 14].

Відхилення напруги від номінального порушує технологічний режим роботи електропечі, плавки металу. При зниженні напруги на 7% процес

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плавки сталі, подовжується в 1,5 рази. Підвищення напруги вище $1,05 U_{ном}$ призводять до перевитрати електроенергії [8, 14].

Зниження напруги на зварювальних електроустановках погіршує якість зварювання [8, 9].

Вентильні перетворювачі зазвичай мають систему автоматичного регулювання на виході постійного струму шляхом фазного управління.

При підвищенні напруги в мережі кут управління автоматично збільшується, а при зниженні напруги – зменшується.

Підвищення напруги призводить до погіршення коефіцієнта потужності перетворювача, який визначається за формулою [4, 8]

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (2.6)$$

де P, Q – активна і реактивна потужність;

S – повна потужність.

Чутливі також до зміни напруги косинусні конденсатори, реактивна потужність, яка видається (генерується) ними, пропорційна квадрату напруги, що підводиться:

$$Q_{KB} = U^2 \cdot \omega_0 \cdot C_{KB}, \quad (2.7)$$

де C_{KB} – ємність конденсатора;

U – прикладена до конденсатора напруга;

ω_0 – кутова частота.

Так при зниженні напруги на 10% потужність конденсатора знизиться до 81%. Підвищення напруги на 10% призведе до збільшення реактивної потужності до 121% і його перевантаження [4, 15].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Таким чином, нормальна робота приймачів електроенергії гарантується при нормальній напрузі і його відхиленнях в межах, зазначених діючих в Україні стандартів [13].

Однак, слід відзначити, що навіть при менших, ніж зазначено в [13] відхиленнях напруги ($\pm 2\%$ і менше) робота обладнання погіршується. Так в разі зниження напруги знижується світловий потік ламп освітлення і, отже, зменшується продуктивність праці.

При електродуговій плавці збільшується час плавки і знос електродів, при асинхронному приводі падає продуктивність механізмів за рахунок збільшення ковзання і т. д. [4].

Допустимі значення відхилень напруги, встановлені у [13], обґрунтовані технічно і економічно, оскільки при більш жорстких вимогах збільшуються витрати на регулювання напруги.

У той же час на даний час вже існують способи регулювання за допомогою сучасних пристроїв статичних тиристорних компенсаторів (СТК) та регульованих конденсаторних батарей (КБ).

2.2 Рівні напруги в системі електропостачання підприємства

Щоб визначити фактори, що впливають на рівні напруги у вузлах електричної мережі, необхідно розглянути принципову схему системи електропостачання промислового підприємства і схему заміщення кожної гілки, так як в кожному випадку параметри активного та реактивного опорів будуть різними.

На рисунку 2.1 представлена принципова схема електропостачання підприємства, яке отримує живлення від загальної енергосистеми (об'єднаної енергосистеми країни).

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

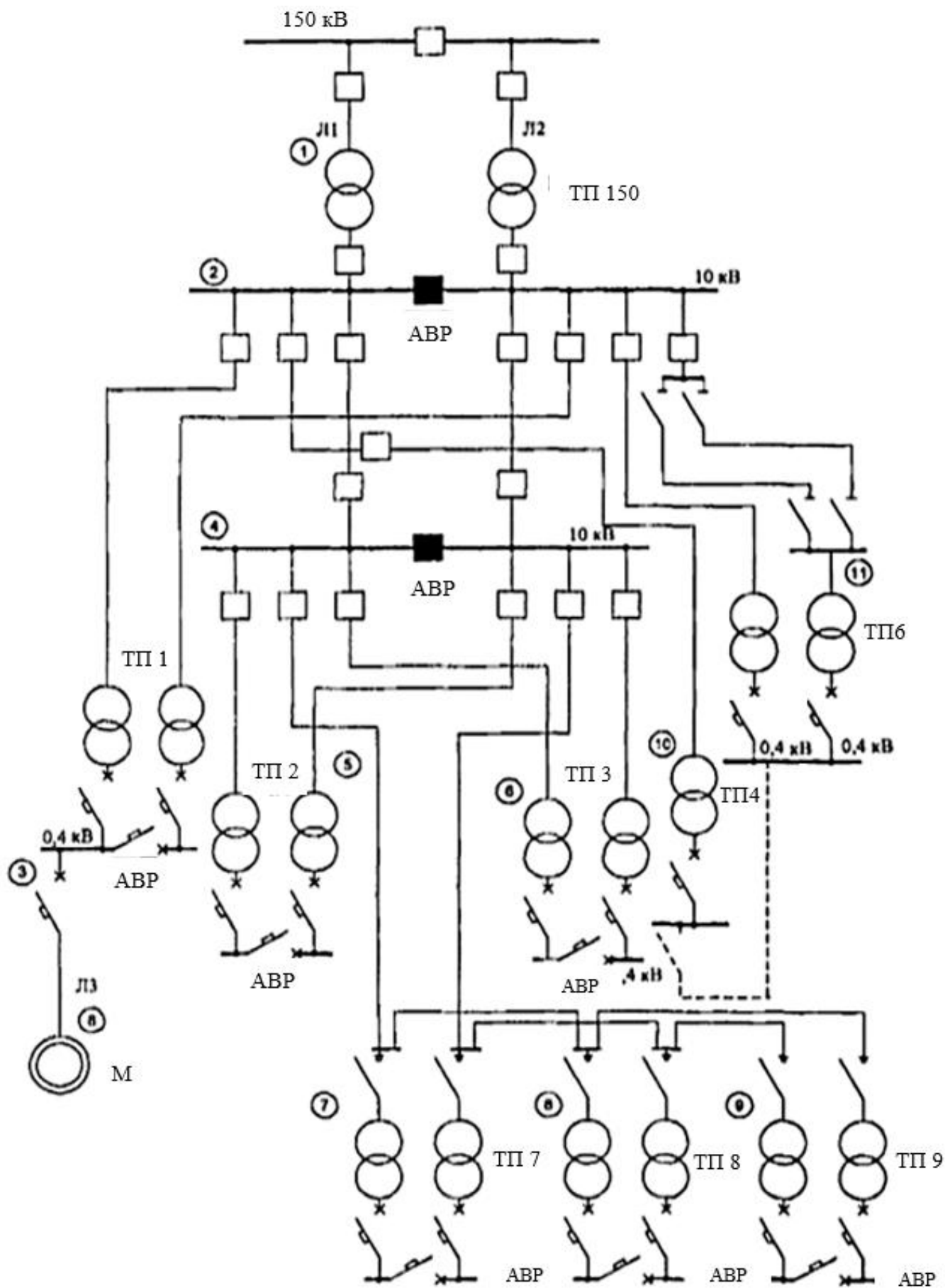


Рисунок 2.1 – Принципова схема електропостачання підприємства

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ

Арк.

31

Кожну гілку схеми, що представлена на рисунку 2.1, можна зобразити схемою заміщення (рисунок 2.2 і 2.3), параметри якої R і X є індивідуальними.

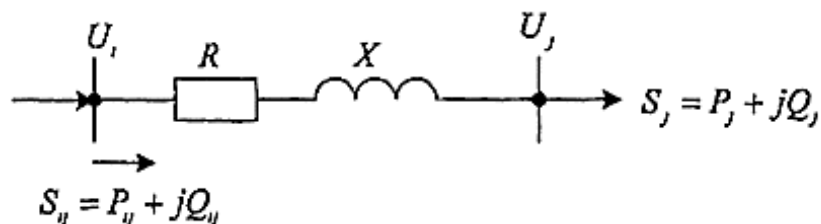


Рисунок 2.2 – Схема заміщення лінії

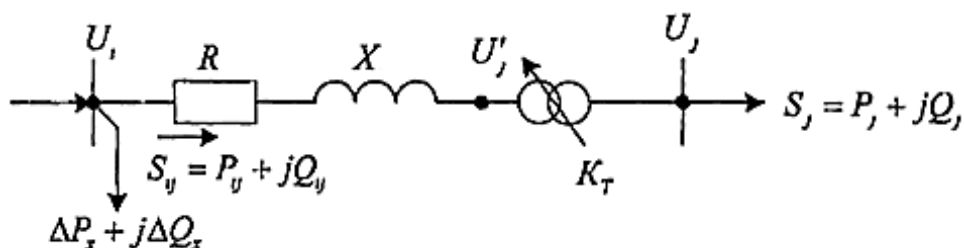


Рисунок 2.3 – Схема заміщення трансформатора

У кожній гілці схеми є втрати напруги, які визначаються за виразом:

$$\Delta U_y = \frac{P_y R + Q_y X}{U_i}, \quad (2.8)$$

де P_y, Q_y – активна і реактивна потужності на початку кожної гілки;
 U_i – напруга у вузлі i (на початку гілки);
 R, X – активний і реактивний опір.

Напруга U_j у вузлі j для схеми на рисунку 2.2 визначається за виразом:

$$U_j = U_i - \Delta U_y. \quad (2.9)$$

Для схеми, що представлена на рисунку 2.3:

$$U'_j = U_i - \Delta U_y, \quad U_j = \frac{U'_j}{K_f}, \quad (2.10)$$

де K_f – коефіцієнт трансформації силового трансформатора.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Розглянемо кілька вузлів схеми, що представлена на рисунку 2.1.

Для вузла 1:

$$U_1 = U_\delta - \Delta U_{Л1} = U_\delta - \frac{P_{Л1} R_1 + Q_{Л1} X_1}{U_\delta}, \quad (2.11)$$

де $P_{Л1}, Q_{Л1}$ – активна і реактивна потужності на початку лінії Л1;

R_1, X_1 – активний і реактивний опір лінії Л1;

U_δ – напруга на шинах джерела живлення.

Для вузла 2 напруга, приведена до вищої напругу трансформатора:

$$U_2' = U_1 - \Delta U_T = U_1 - \frac{P_T R_T + Q_T X_T}{U_1}, \quad (2.12)$$

де R_T, X_T – опір трансформаторів головної знижувальної підстанції (ГЗП);

P_T, Q_T – активна і реактивна потужності на початку трансформатора ГЗП.

Дійсна напруга у вузлі 2 залежить від коефіцієнта трансформації ТП 150:

$$U_2 = \frac{U_2'}{K_T}, \quad (2.13)$$

Для вузла 3:

$$U_3 = \frac{U_2 - \frac{P_{КЛ}(R_{КЛ} + R_{Т1}) + Q_{КЛ}(X_{КЛ} + X_{Т1})}{U_2}}{K_{Т1}}, \quad (2.14)$$

де $R_{КЛ} + R_{Т1} = R, X_{КЛ} + X_{Т1} = X$ – активний та реактивний опори кабельної лінії і трансформатора ТП 1;

$K_{Т1}$ – коефіцієнт трансформації трансформатора ТП 1.

Для вузла 8:

$$U_8 = U_3 - \Delta U_{Л3} = U_3 - \frac{P_{Л3} R_3 + Q_{Л3} X_3}{U_3}, \quad (2.15)$$

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $P_{ЛЗ}, Q_{ЛЗ}$ – потужності на початку лінії ЛЗ;

R_3, X_3 – активний і реактивний опір лінії ЛЗ.

Якщо в схемі електропостачання підприємства не вживати ніяких заходів щодо підтримки напруги на необхідному рівні, то очевидно, що для ряду вузлів рівні напруги U_i , перевищать допустимі значення (збільшаться або зменшаться).

Параметри елементів електричної мережі, (трансформаторів, ліній електропередавання), неправильний вибір перерізів ліній (кабельних, повітряних або шинопроводів) і потужності силових трансформаторів впливає на втрати напруги за рахунок зміни опорів цих елементів.

Живлячі і розподільні мережі (мережі понад 1000 В) зазвичай за втратами напруги не перевіряють, але при магістральних схемах живлення не рекомендується по одній лінії жити більше чотирьох-п'яти підстанцій [4?].

Цехові електричні мережі повинні обов'язково перевірятися за допустимою втратою напруги в силу їх розгалуженості і великого числа приймачів електроенергії. Найбільша втрата напруги в цеховій мережі не повинна перевищувати значення, при якій усталене відхилення напруги відповідає вимогам стандарту [13].

Коефіцієнти трансформації силових трансформаторів.

На головній підстанції підприємства (ТП 150) коефіцієнти трансформації змінюються під навантаженням за рахунок пристрою РПН (регулювання під навантаженням).

На цехових трансформаторних підстанціях (ТП1...ТП9) коефіцієнти трансформації змінюються за рахунок пристроїв ПБЗ (перемикання без збудження).

Із проведеного аналізу можна виділити основні фактори, що впливають на відхилення напруги в мережі промислового підприємства, що представлені на рисунку 2.4.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



Рисунок 2.4 – Фактори, що впливають на рівень напруги у вузлах електричної мережі підприємства

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ

Арк.

35

Таким чином факторами, що впливають на рівні напруги у вузлах електричної мережі є (рисунок 2.4) [4, 8]:

– втрати напруги, що викликані струмами навантаження, що проходять по елементам мережі. Втрати напруги безперервно змінюються і залежать від режиму роботи мережі живлення, від режиму роботи приймачів електричної енергії, що пов'язаний із технологічним процесом і графіком роботи підприємства;

– параметри елементів електричної мережі, (трансформаторів, ліній електропередачі). Неправильний вибір перерізів ліній (кабельних, повітряних, шинопроводів) і потужності силових трансформаторів впливає на рівень втрат напруги за рахунок зміни опорів цих елементів;

– неправильна побудова схем електричних мереж системи електропостачання, живлячих, розподільних або цехових. Живлячі і розподільні мережі (мережі напругою понад 1000 В) зазвичай за втратами напруги не перевіряють, але при магістральних схемах живлення не рекомендується по одній лінії жити більше чотирьох-п'яти підстанцій. Цехові ж мережі повинні обов'язково перевірятися за допустимою втратою напруги в силу їх розгалуженості і великої кількості різнорідних приймачів електроенергії. Найбільша втрата напруги в цеховій мережі підприємства не повинна перевищувати значення, що встановлені у ДСТУ EN 50160:2014 [13];

– коефіцієнти трансформації силових трансформаторів. На головній підстанції підприємства коефіцієнти трансформації змінюються під навантаженням за рахунок застосування пристрою РПН, а на цехових ТП за рахунок пристрою ПБЗ;

– рівень вхідної напруги на шинах джерела живлення промислового підприємства.

У зв'язку із значенням вище, виникає необхідність підтримки напруги в різних вузлах мережі підприємства та окремих цехів в допустимих межах, що зумовлює необхідність його регулювання.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Регулювання напруги – процес зміни рівнів напруги в характерних точках електричної мережі за допомогою спеціальних технічних засобів.

Підвищення напруги живильних мереж, як правило, покращує техніко-економічні показники системи електропостачання промислових підприємств, одночасно поліпшується і якість електроенергії у споживачів.

Якщо зміна схеми електропостачання промислового підприємства неможлива, то для того, щоб відхилення напруги у приймачів електричної енергії не перевищували меж, встановлених діючими нормативами [8, 16], застосовуються різні способи і засоби регулювання напруги: на шинах центру живлення, зміна опору елементів мережі та реактивного струму, що протікає в мережі, зміна коефіцієнта трансформації розподільних трансформаторів і автотрансформаторів.

До основних засобів регулювання напруги в промислових електричних мережах слід віднести: трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН), регулювання напруги за допомогою регульованих батарей конденсаторів і статичних тиристорних компенсаторів (СТК) [1, 8].

Крім того, можуть використовуватися і неавтоматизовані засоби, наприклад трансформатори з перемикачем без збудження (ПБЗ), нерегульовані батареї конденсаторів.

Розмахи змін напруги є наслідком швидкої зміни напруги в мережі, що пов'язано з виникненням різко змінних навантажень.

Для зниження або усунення впливу різко змінних навантажень, створюваних потужними електропечами, великими двигунами, випрямлячами і т. д., при проектуванні або модернізації систем електропостачання промислових підприємств необхідно передбачати наступні заходи:

- виділення приймачів з різко перемінним навантаженням на живлення від самостійних ліній безпосередньо від джерела електроенергії;
- застосування паралельної роботи живлячих ліній і трансформаторів на головній підстанції підприємства (ГПП) з урахуванням збільшення струмів КЗ, що викликаного цим режимом;

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- обмеження струмів пуску і самозапуску двигунів;
- застосування автоматичного регулювання збудження потужних синхронних двигунів, що працюють в режимі перезбудження, для зменшення накидів реактивної потужності;
- застосування СТК;
- розподілення на окремі лінії або окремі трансформатори споживачів, що не допускають поштовхів навантаження, наприклад освітлення;
- приєднання ударних і спокійних навантажень на різні плечі здвоєних реакторів або різні обмотки трансформаторів типу ТРДН (з розщепленими обмотками).

На цехових підстанціях зазвичай встановлюються трансформатори без регулювання під навантаженням (ПБЗ), що перемикаються сезонно, так як вони мають основну і 4 додаткові відпайки, рідше – 6 з кроком регулювання 2,5% [8, 18].

Тому протягом доби трансформатори із ПБЗ працюють на одній регульованій відпайці і відповідно з одним і тим же коефіцієнтом трансформації.

Тоді при зміні режиму роботи навантаження, а протягом доби останні змінюються від найменших до найбільших, напруга в мережі постійно змінюється і майже завжди відрізняється від номінальної величини.

Автотрансформатори мають пристрій регулювання під навантаженням, що вбудоване на лінійному кінці обмотки середньої напруги.

Централізованим є регулювання напруги на електростанціях за рахунок зміни напруги на шинах генераторів. За принципом роботи генератора і його режиму, можливо, змінювати напругу на шинах генератора, тільки в межах $\pm 5\% U_{ном.ген.}$

При великих межах регулювання напруги необхідно знижувати потужність генератора, що економічно не вигідно.

Тому генератори електростанцій є тільки допоміжним засобом регулювання напруги, крім того, діапазон регулювання в межах $\pm 10\% U_{ном.ген}$ недостатній і при такому регулюванні важко виконати вимоги по напрузі для віддалених і прилеглих споживачів.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зміни потоків реактивної потужності в мережі промислових підприємствах дуже часто застосовують батареї статичних конденсаторів.

Складова падіння напруги в мережі ΔU_M визначається за формулою [4]:

$$\Delta U_M = \frac{P_M R_M + Q_M X_M}{U_M}, \quad (2.16)$$

де P_M, Q_M – потоки потужності в мережі;

R_M, X_M – потоки опору мережі.

Оскільки в живлячих мережах $X_0 > R_0$, то найбільший вплив на величину ΔU_M має складова $\frac{Q_M X_M}{U_M}$.

При використанні пристроїв компенсації зміна напруги відбувається за рахунок регулювання їх реактивної потужності.

$$U_2 = U_1 - \frac{P_M R_M + (Q_M \pm Q_{нк}) X_M}{U_2}, \quad (2.17)$$

де U_1 – напруга на початку розглянутої ділянки;

U_2 – напруга в точці установки пристрою компенсації;

$Q_{нк}$ – потужність пристрою компенсації.

У СТК застосовуються регульовані реактори паралельно з конденсаторними батареями, які можуть бути регульованими і нерегульованими.

Всі перераховані вище способи регулювання напруги за рахунок зміни потоків реактивної потужності по'язані із забезпеченням її балансу в електричних мережах.

Місцеве регулювання напруги у вузлах розподільчої мережі підприємства, цехових мережах і безпосередньо на затискачах приймачів електричної енергії виконується за рахунок зміни втрат напруги в елементах електричної мережі в основному шляхом регулювання потоків реактивної потужності, рідше шляхом збільшення перерізу струмоведучих елементів (кабелів, шинопроводів).

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Збільшення перерізу струмоведучих елементів – дуже складне, використовується, в основному, при реконструкції електричних мереж.

Для регулювання потоків реактивної потужності служать різні пристрої компенсації, що підключаються у вузлах електричної мережі підприємства, регулюючи режим роботи яких відповідно до характеру зміни реактивної потужності навантажень у вузлах мережі, можна підтримувати напругу в цих вузлах в заданих межах [4, 18].

$$U_2 = U_1 - \frac{P_M R_M + (Q_M \pm Q_{пк}) X_M}{U_{ном}}, \quad (2.18)$$

де U_1 – напруга на початку розглянутої ділянки;

$U_{ном}$ – напруга в точці установки компенсатора;

$Q_{пк}$ – потужність пристрою компенсації;

R_M і X_M – активний і реактивний опір мережі.

В якості компенсуючих пристроїв в мережах промислових підприємств використовуються батареї статичних конденсаторів, в мережах постійного живлення з різко змінним навантаженням СТК і регульованого джерела реактивної потужності (РДРП), що містять конденсатори, реактори і тиристорні перетворювачі або регулятори [18, 19].

Аналіз способів регулювання напруги в електричних мережах показує, що для промислових мереж найбільш характерними є:

- зміна коефіцієнтів трансформації трансформаторів;
- зміна втрат напруги за рахунок регулювання потоків реактивної потужності.

Слід відмітити, що перший спосіб використовується для централізованого регулювання напруги у всій системі електропостачання підприємства, а другий для місцевого регулювання напруги в електричних мережах окремих цехів і на затискачах потужних приймачів електричної енергії, оскільки трансформатори цехових підстанцій мають тільки пристрій перемикачів без збудження.

На рисунку 2.5 представлена класифікація способів і засобів регулювання напруги в електричних мережах.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

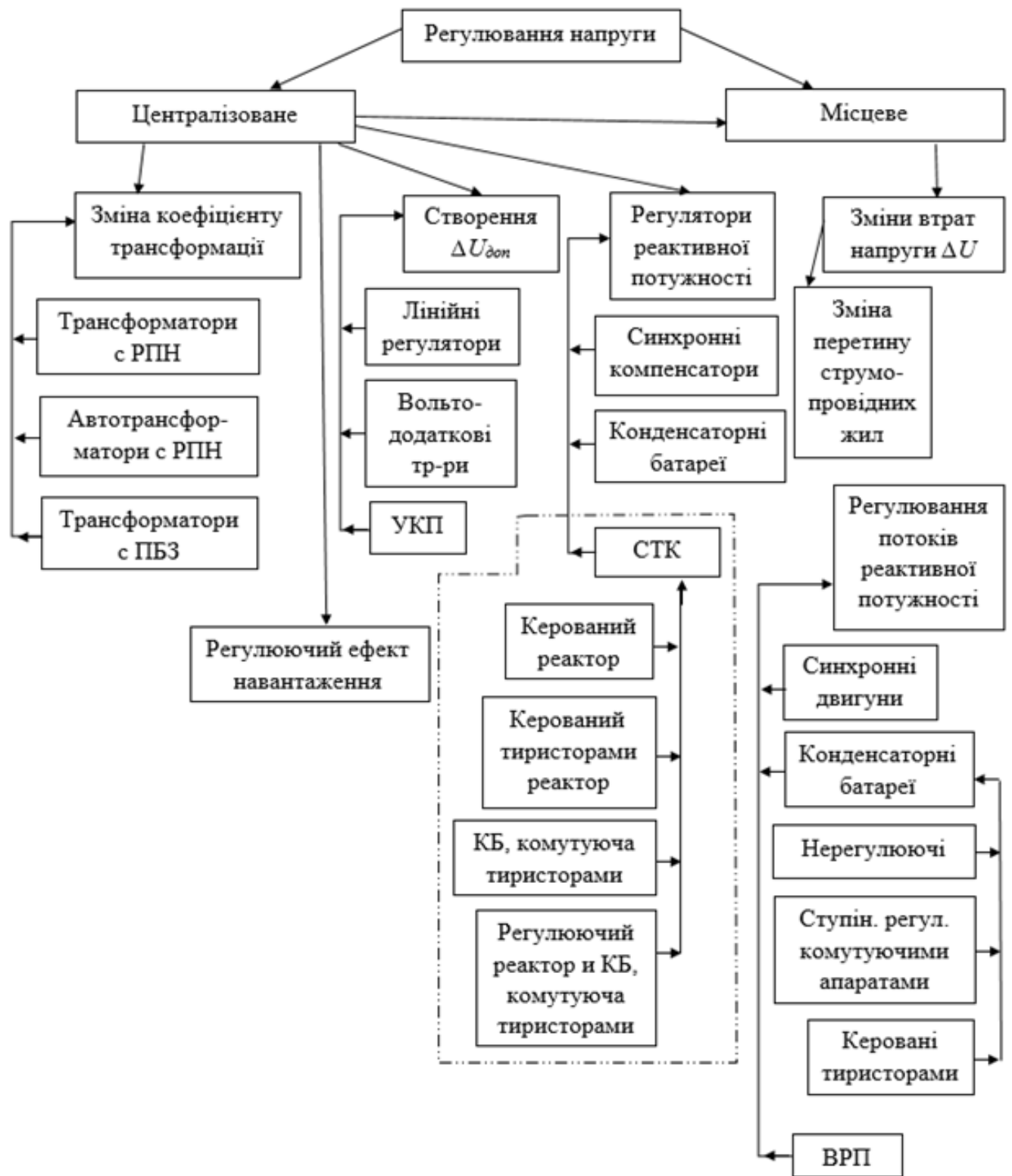


Рисунок 2.5 – Класифікація способів і засобів регулювання напруги в електричних мережах

Для окремих потужних цехових споживачів електричної енергії, чутливих до змін рівня напруги або навпаки, вимагають регулювання напруги в широких межах, можливе застосування спеціальних трансформаторів з широким діапазоном зміни вихідної напруги в збудженому стані

трансформаторів (автотрансформаторів) або використання тиристорних регуляторів при перемиканні виводів трансформаторів [20]. Однак ці пристрої складні і не забезпечують компенсації реактивної потужності споживачам. Тому в подальшому розглядаються типи компенсуючих пристроїв, які мають бути швидкодіючими, з плавним регулюванням реактивної потужності.

При регулюванні потоків реактивної потужності за рахунок роботи пристроїв компенсації можна не тільки змінювати втрати напруги в електричній мережі, а й знижувати втрати активної потужності і відповідно втрати електричної енергії в елементах мережі (лініях і трансформаторах).

Втрати активної потужності в електричних мережах при роботі пристроїв компенсації розраховуються за формулою:

$$\Delta P_y = \frac{P_y^2 + (Q_y - Q_{j.ky})^2}{U_{ном}^2} \cdot R_y, \quad (2.19)$$

де $Q_{j.ky}$ – потужність пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП), що видає в мережу реактивну потужність.

Ефективність роботи компенсуючих пристроїв, тобто їх регулюючий ефект можна оцінити таким чином. При включенні або відключенні ПКРП напруга в точці їх підключення змінюється на значення:

$$\Delta U = \frac{Q_{j.ky} X_y}{U_{ном}}, \quad (2.20)$$

де X_y – реактивний опір кола джерело живлення.

Для ПКРП, що підключені до шин 380 В цехових підстанцій, ефект регулювання можна наближено визначити за виразом:

$$\Delta U \cong \frac{Q_{j.ky} X_T}{U_{2ном}}, \quad (2.21)$$

де $U_{2ном}$ – номінальна напруга на вторинній стороні трансформатора;

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

X_T – його індуктивний опір рівний у відносних одиницях напрузі короткого замикання трансформатора U_{K3} .

З урахуванням виразу (2.19) ΔU у відносних одиницях при приведенні параметрів до вторинної напруги трансформатора складатиме:

$$\Delta U' = \frac{Q_{j.ky} U_{K3}}{U_{2ном}^2} = \frac{Q_{пк}}{S_{Тном}}, \quad (2.22)$$

де $S_{Тном}$ – номінальна потужність цехового трансформатора.

Особливістю цехових мереж низької напруги (380/220 В) є співмірність їх активного і індуктивного опору. Тому для таких мереж рівні напруги на шинах НН визначаються реактивним опором сумарного опору цехового трансформатора Z'_T , опором зовнішньої мережі Z_m , а також величиною потужності навантаження, тобто її активної та реактивної складовою.

$$Z'_T = \sqrt{R_T'^2 + X_T'^2} = \sqrt{\frac{\Delta P_T'^2}{S_{Тннo}^2} + U_{K3}'^2} \cdot \frac{S_a}{S_{Тном}}, \quad (2.23)$$

де ΔP_T – втрати в обмотках трансформатора.

Якщо навантаження симетричне за фазами, то можна розглядати процес зміни напруги тільки в одній фазі, в двох інших вони будуть аналогічні.

2.3 Аналіз системи електропостачання печей графітації цеху №4

Графітація є заключною операцією при виробництві графітових виробів. Графітація – процес термічного перетворення неграфітових вуглецевих матеріалів у графіт.

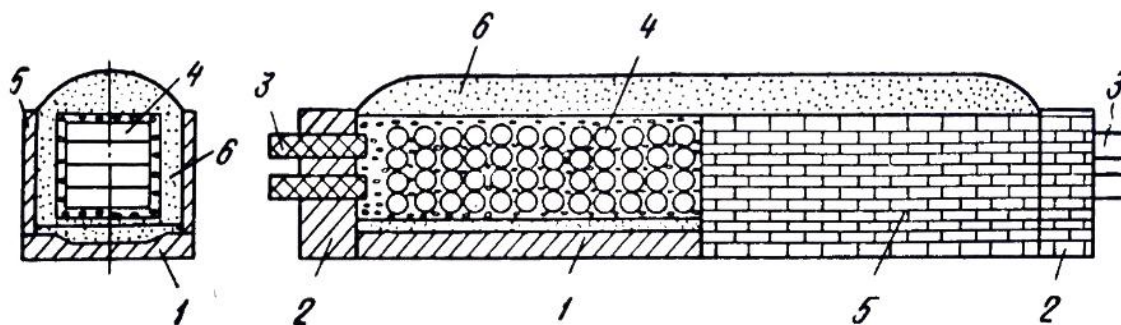
На підприємстві процес графітації проводиться в спеціальних печах електричного опору прямого нагріву. Опором, у цих печах при графітуванні електродів є саме завантаження (вміст) печі, тобто електроди і пересипання, а

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при отриманні штучного порошкоподібного графіту – зернистий вуглецевий матеріал. Нагрів у печі проводиться до високих температурах, які досягають 2500 °С [6].

Електрична енергія підводиться до робочого об'єму (керн) за допомогою електродів. Струмopровідні електроди, закладені в торцеву стінку, називають електродним пакетом.

На рисунку 2.6 зображено технологічну схему завантаження печі графітації.



1 – подина; 2 – торцеві стінки; 3 – струмопровідні електроди;
4 – заготовки; 5 – бічні стінки; 6 – теплоізоляційна шихта

Рисунок 2.6 – Схема печі графітації

Процес графітування виробів надзвичайно енергоємний. Виходячи з теплоємності обпалених заготовок [6] можна оцінити кількість енергії необхідної для графітування одного моля вуглецевмісної речовини ~ 60 кДж моль, що відповідає питомій витраті електроенергії в 1400 кВт·год/т. На практиці ж питома витрата електроенергії набагато більше. Звичайно питома витрата електроенергії (ПВЕ) при графітуванні в печах Ачесона – 4500-5500 кВт·год/т (до 6500 кВт·год/т при графітуванні особливо якісних виробів) [6]. Тривалість процесу графітування від 36 до 120 годин.

Сила струму в сучасних печах досягає декількох десятків тисяч ампер, тому електродний пакет повинен бути складений з такого числа електродів, щоб загальний їх переріз задовольняв вимогам за допустимою щільністю струму. Найчастіше використовуються графітові електроди, так як вони мають високу електропровідність і допускають високі щільності струму – до 12 А/см²) [6].

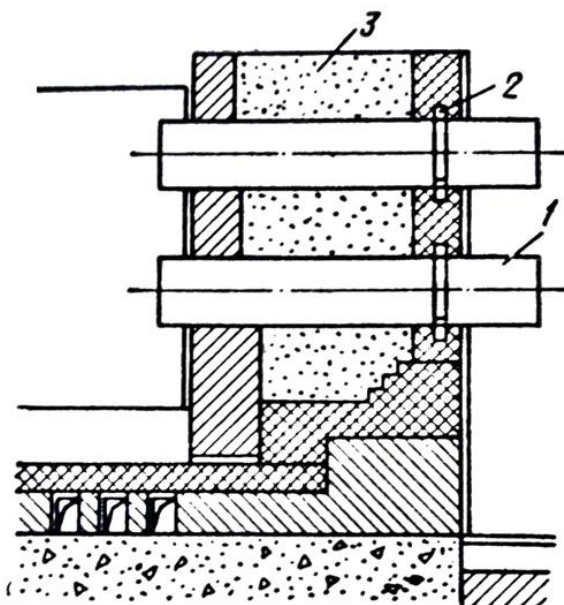
					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Струмопровідні електроди є одночасно провідниками електричного струму в піч і провідниками теплоти, що йде з печі, тому для охолодження їх змочують водою і встановлюють під невеликим кутом, щоб вода не затікала в стінку.

Рівномірне підведення струму в цьому випадку повинно забезпечуватися за рахунок заповнення простору між струмопровідним пакетом і керном зерновим матеріалом з більшою електропровідністю.

Особливістю цих пічних установок є живлення групи печей від одного силового трансформатора, що викликано вимогою безперервної роботи трансформатора при періодичній роботі печей. Ця обставина вимагає укладання спеціального шинного пакета (головного) уздовж фронту печей, які складають секцію.

На рисунку 2.7 показано закладання струмопровідних електродів в торцеву стінку печі.



1 – електрод; 2 – сальникове ущільнення; 3 – графітовий порошок

Рисунок 2.7 – Схема закладання струмопровідних електродів

Під терміном «шинний пакет» слід розуміти систему шин, що складається з великого числа провідників, які конструктивно пов'язані між собою і складають єдиний струмопровід.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Головний шинний пакет являє собою найбільш довгу частину вторинного струмовідводу. Тому повинні бути вжиті всі заходи для зниження його індуктивного опору.

Головний шинний пакет розташовується уздовж стіни цеху на висоті близько 3 м від підлоги. Кріплення шин здійснюється діабазовими гребінками, котрі спираються на кронштейни, укріплені на стені. Довжина пакета визначається кількістю і розмірами печей в секції [6].

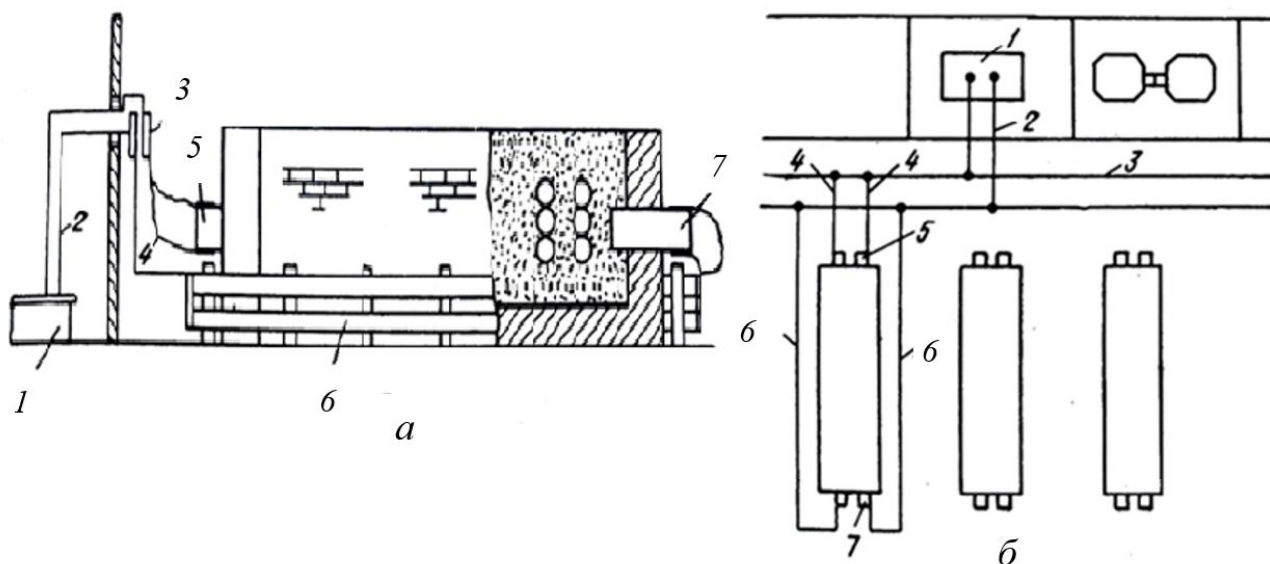
Від головного шинного пакета через роз'єднувачі і гнучкі або жорсткі зв'язки струм підводиться до пічного ошинування. Ошинування малої петлі роблять постійним, а шинні пакети пічної петлі для економії кольорового металу виготовляють переносними. Зазвичай на секцію робиться один комплект переносних шин, які від'єднуються від печі після закінчення кампанії та після цього переносяться на наступну підготовлену піч.

При конструюванні і експлуатації печей та переносних пакетів слід прагнути, щоб шини розташовувалися якомога ближче до стінок печі і розподілялися рівномірно по більшій частині периметра печі. Таке розташування шинного пакета знижує реактивність контуру печі і впливає на збільшення коефіцієнта потужності [6].

Коротка електрична мережа печі (рисунок 2.8) складається з наступних ділянок: шинопровід 2 від трансформатора 1 до головного шинного пакета 3; шинопровід 4 від головного пакету до найближчого електрода 5 «мала петля» і шинопровід 6 від головного шинного пакета до віддаленого заднього електрода печі 7 «пічна петля». Протяжність мережі пічної петлі для великих печей досягає 30 м [6].

Електропостачання секцій печей графітації здійснюється підстанцією ТП-2. Підстанція ТП-2 призначена для зниження змінного струму напругою 10 кВ за допомогою трансформаторів до 0,204 кВ для живлення печей графітації секцій №5 та №6 цеху графітації №4.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



a – піч графітації; *б* – секція печей графітації

Рисунок 2.8 – Схема електричної короткої мережі печі графітації

Головною метою персоналу ТП-2 є ведення електричних режимів процесу графітації пічних секцій цеху №4 на змінному струмі із застосуванням «Інформаційно-вимірювальної системи контролю ведення графіків процесу графітації» на секціях №5 та №6, а також експлуатація та оперативне обслуговування електроустаткування ТП-2 і пічних секцій змінного струму.

На першому поверсі ТП-2 розміщені:

- пульти управління електроустаткуванням секцій печей графітації змінного струму №5,6 на яких розміщені вимірювальні прилади, лічильники обліку електроенергії, аварійна і попереджувальна сигналізація, ключі управління вимикачами секцій, автомати ланцюгів управління і сигналізації, реле захистів секцій, вказівні реле захистів і блокувань, прилади контролю ізоляції на головному шинопакеті (ГШП);
- панель обліку, на якій розташовані: вимірювачі миттєвої потужності секцій №5,6 та прилади контролю напруги оперативного струму;
- комп'ютер системи комерційного обліку електроспоживання підприємством і сторонніми споживачами;
- комп'ютер «Інформаційно-вимірювальної системи контролю ведення графіків процесу графітації на секціях №5, 6»;

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

- комп'ютер «Мнемосхема електропостачання ТП 150/10 «Графіт»;
- шафа сигналізації системи автоматичного пожежогасіння;
- розподільні пункти власних потреб;
- приміщення щита управління обладнано системою кондиціонування повітря;

- приміщення маслоохолоджувачів і маслонасосів трансформаторів секції №5.

На другому поверсі ТП-2 розміщені:

- комплектний розподільний пристрій пічних секцій №5, 6;
- комплектний розподільний пристрій силових споживачів;
- шафа оперативного струму;
- блок живлення стабілізованою напругою;
- блок живлення розподільчого пристрою;
- розподільні пункти власних потреб;
- шафа аварійного вводу резерву власних потреб.

Перетворювальна підстанція ТП-4 призначена для перетворення змінного струму напругою 10 кВ за допомогою трансформаторів та випрямних агрегатів ВАК-25 000/10-0,3кВ з кремінними випрямлячами в постійний струм напругою до 0,3 кВ для живлення печей графітації секції №4 цеху графітації №4.

Цехові підстанції отримують живлення від головної ТП підприємства ТП 150 кВ «Графіт». Підстанція «Графіт» призначена для електропостачання підрозділів підприємства і сторонніх споживачів напругою 10 кВ і складається з:

- відкритого розподільного пристрою ВРП-150 кВ, ВРП-10 кВ;
- відкритого розподільного пристрою ВРП-10 кВ;
- закритого розподільного пристрою ЗРП-10 кВ;
- загальнопідстанційного пульта управління – ЗПУ;
- допоміжних приміщень.

Електропостачання секцій печей графітації змінного струму №5 та №6 напругою 10 кВ здійснюється від пічного КРП-10 кВ.

Живлення пічних секцій змінного струму №5,6 здійснюється напругою 10 кВ від пічного комплектного розподільного пристрою КРП-10 кВ. Кожна з

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пічних секцій змінного струму укомплектована пічними трансформаторами ЕОЦН, які підключені до мережі 10 кВ на дві фази.

Кожна секція складеться з семи печей графітації. Під час процесу графітації до головного шинопакету підключена лише одна піч. У шести інших печах в цей момент може вироблятися або завантаження електродів в піч, або навпаки їх вивантаження з печі, або електроди просто можуть перебувати в печі для їх охолодження після процесу графітації.

Однофазні печі графітації електродів мають підведення струму по торцях, що при порівняно великій довжині печей (7-10 м) призводить до появи струму, що має великий індуктивний опір. Внаслідок цього $\cos \phi$ таких установок має величину близько 0,75.

Тому для поліпшення якості графітації та якості електроенергії до головного шинопакету печі підключена конденсаторна установка через два компенсаційних трансформатора.

Такий спосіб підключення конденсаторної батареї дозволяє розвантажити головний шинопакет, пічний трансформатор і високовольтну мережу від реактивної складової струму і підвищити $\cos \phi$.

Секції №5 має однофазне навантаження, пічний трансформатор підключається до мережі 10 кВ на дві фази «А» та «В». На секції встановлено один пічний трансформатор ПТ-1 і два компенсаційних – ТК-1 і ТК-2.

Електропічні трансформатори представляють собою один з різновидів трансформаторів спеціального призначення. Їх особливості продиктовані особливими параметрами, умовами і режимом роботи навантаження різного призначення. Вони забезпечують регулювання напруги відповідно до вимог технологічного процесу. Номінальні параметри трансформаторів секції №5 приведені у таблиці 2.1.

ЕОЦН-12500/10-УЗ – електропічний однофазний масляний трансформатор типовою потужністю 12500 кВА, напругою 10 кВ внутрішньої установки з примусовою циркуляцією масла та регулюванням напруги під навантаженням, призначений для живлення електричних печей.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Параметри пічних і компенсаційних трансформаторів

Параметр	ПТ-1	ТК-1, ТК-2
Тип трансформатору	ЕОЦН-12500/10	ЕОЦН-8200/10
Потужність трансформатора, кВА	9200	7650
Напруга первинної обмотки, В	10000	
Напруга вторинної обмотки, В	204-124	204-137
Номінальний струм первинної обмотки, А	920	765
Номінальний струм вторинної обмотки, А	45100-51540	37500-45500

Основною відмінністю електропічних трансформаторів від трансформаторів загального призначення є великі значення струму, що досягають значень понад 100 кА на вторинній обмотці, при низькому значенні вторинної напруги.

Напруга, в залежності від типу живлення печі і технологічного процесу, може змінюватися в широких межах. Діапазон зміни вторинної напруги в електропічному трансформаторі може досягати відношень 5:1 і більше.

Зміна напруги може забезпечуватися електропічними трансформаторами, які мають регулювання під навантаженням (РПН), або при відключеному від мережі трансформаторі, тобто з перемикачем без збудження (ПБЗ).

Електропічні трансформатори працюють у важких умовах. Вони характеризуються частими перенапруженнями і струмовими перевантаженнями. Тому ці трансформатори сконструйовані таким чином, щоб витримувати часті, експлуатаційні короткі замикання, теплові навантаження і перенапруження.

На рисунку 2.9 зображена електрична схему пічної секції №5.

В даний час до пічної секції №5 підключена конденсаторна установка (КУ) потужністю 19330 кВАр, яка складається з конденсаторних батарей типу КС2-10,5-75-2УЗ. Це косинусні конденсатори просочені соволом внутрішньої установки, напругою 10,5 кВ та потужністю 75 кВАр.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

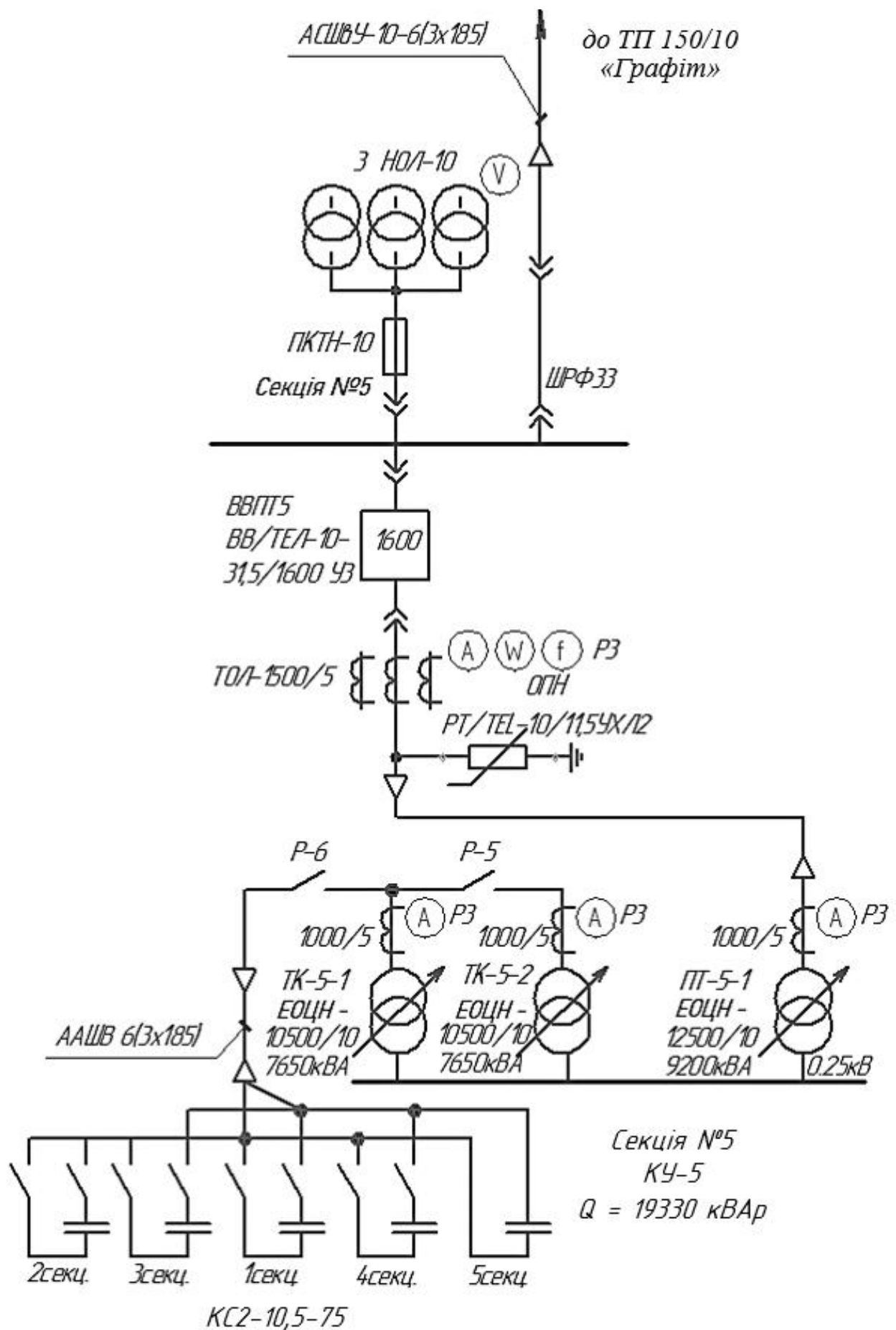


Рисунок 2.9 – Схема живлення пічної секції №5 цеху №4

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Конденсаторна установка підключається до компенсаційних трансформаторів за допомогою роз'єднувачів Р-5, Р-6, які встановлені в камерах трансформаторів ТК-1 та ТК-2.

Напруга від головного шинного пакету підвищується трансформаторами ТК-1 та ТК-2 до напруги 10,5 кВ і подається на конденсаторну установку секції.

Конденсаторна установка має 5 секцій і 4 роз'єднувача, перша секція підключається роз'єднувачем Р-6 разом з ТК-1. Інші 4 секції конденсаторної установки мають власні роз'єднувачі, якими надалі поступово підключаються.

Головним недоліком цього способу компенсації реактивної потужності є застарілий метод підключення, тобто вона підключається в ручну. При кожному підключенні секції КУ, потрібно дочекатися, щоб значення $\cos \phi$ дорівнювало 0,85 після чого відключається певна секція.

Після відключення оперативний персонал підстанції ТП-2 цеху вручну вмикає роз'єднувач однієї з секцій КУ, це все займає час та призводить до споживання реактивної потужності в період між вмиканням секцій КУ.

На початку компанії $\cos \phi$ дорівнює 0,96 та поступово зменшується на протязі всієї компанії, для його поліпшення і використовуються конденсаторні батареї. Вже в кінці компанії $\cos \phi$ складає 0,74 в середньому. Хоча компенсація реактивної потужності присутня, але при ручному регулюванні, вона показує не найкращі результати. Сьогодні вже використовується сучасні конденсаторні установки з автоматичним регулюванням, які дозволяють утримувати $\cos \phi$ в межах 0,98-0,90.

Завдяки технічним і експлуатаційним параметрам автоматичних установок коефіцієнт потужності при мінімальних і максимальних навантаженнях на мережу підтримується в автоматичному режимі і повністю виключає можливість перекомпенсації [20].

Установки формують чіткий баланс реактивної потужності самостійно, не вимагають втручання обслуговуючого персоналу.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання конденсаторних установок знижує струмові навантаження на всі розподільні обладнання, нормалізує напругу в ключових вузлах енергосистеми.

Дані пристрої доцільно купувати, якщо підприємство зацікавлене в оптимізації роботи своєї енергосистеми.

Така продукція необхідна на більшості промислових і виробничих об'єктів машинобудівного, нафтового, газового, харчового комплексу, а також на будь-яких підприємствах, що мають справу з великими обсягами споживаної електроенергії.

Конденсаторні установки компенсації реактивної потужності забезпечують автономне утримання запрограмованого коефіцієнта потужності (за рахунок своєчасного відключення або включення регулюючих ступенів), захист від перевантаження, аварійну сигналізацію, захист від спотворень вищих гармонік, індикацію струму в конденсаторних батареях.

За рахунок того, що конденсатори з автоматичним регулюванням потужності ефективно працюють в області коефіцієнта реактивної потужності, їх використання на промислових підприємствах і об'єктах несе в собі відчутну економічну вигоду.

Завдяки КУ з автоматичним керуванням значно підвищується коефіцієнт потужності, завдяки чому практично виключається потенційна можливість штрафних санкцій, які можуть накласти на підприємство представники енергопостачальних компаній.

Зменшуються втрати корисної активної потужності та напруги в процесі розподілу і передачі електроенергії.

Знижуються фінансові витрати на генерацію і споживання електроенергії, система в цілому починає працювати більш надійно і економічно.

Відповідно, якщо встановити сучасний компенсуючий пристрій, який автоматично без відключень буде покращувати $\cos \phi$, підприємство зможе заощадити на споживанні реактивної потужності.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 2

Баланс реактивної потужності визначає рівень напруги у вузлах електричної мережі підприємства, який є одним з найважливіших показників режиму роботи електричних мереж та електрообладнання, що до них приєднано. До засобів регулювання напруги в промислових електричних мережах слід віднести: трансформатори з РПН, регулювання напруги за допомогою батарей конденсаторів і статичних тиристорних компенсаторів.

При регулюванні потоків реактивної потужності за рахунок роботи пристроїв компенсації можна не тільки змінювати втрати напруги в електричній мережі, а й знижувати втрати активної потужності і відповідно втрати електричної енергії в елементах мережі (лініях і трансформаторах).

На підприємстві процес графітації проводиться в спеціальних печах електричного опору прямого нагріву, які під час роботи мають високий індуктивний опір і, відповідно, споживають значні обсяги реактивної потужності, що веде до суттєвого зниження $\cos \phi$ в мережі підприємства.

Для поліпшення якості графітації та якості електроенергії до шинопакету печі підключена конденсаторна установка із ручним ступінчастим регулюванням ємності. На початку компанії графітації $\cos \phi$ дорівнює 0,94...0,96 та поступово зменшується протягом всієї компанії. Вже в кінці компанії $\cos \phi$ складає 0,5...0,74. Хоча компенсація реактивної потужності присутня, але при ручному регулюванні, вона показує не найкращі результати. Головним недоліком є те, що ємність змінюється в ручну черговим персоналом.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА

3.1 Джерела реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств

Для початку розглянемо ряд відомих фактів. Реактивна потужність є однією із характеристик роботи змінного струму і відображає фізику процесу обміну енергії між джерелом електричної енергії та реактивними елементами мережі. На відміну від активної потужності, що не зворотно перетворюється в механічну, теплову та іншу потужність, реактивна характеризує оборотний процес періодичного накопичення і повернення енергії в електричні, і магнітні поля електричного кола [15, 18].

Для джерела синусоїдальної напруги можна записати

$$u = U_m \sin(\omega t). \quad (3.1)$$

При підключенні навантаження до такого джерела, виникне струм навантаження форму якого можна записати як

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.2)$$

Цей струм зсунутий по фазі відносно напруги на кут φ . При цьому в колі споживається миттєва потужність, що має формулу:

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i), \quad (3.3)$$

де U, I – діючі значення напруги та струму;

φ – кут зсуву між напругою і струмом ($\psi_u + \psi_i$);

ω – кутова частота зміни фази.

При цьому значення середньої миттєвої потужності знаходяться як:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [u(t)i(t)] dt, \quad (3.4)$$

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $u(t)$ – миттєва напруга, В;

$i(t)$ – миттєвий струм, А.

Згідно рівняння (3.3) можна привести графічні залежності (рисунок 3.1)

$u, p, i = f(t)$.

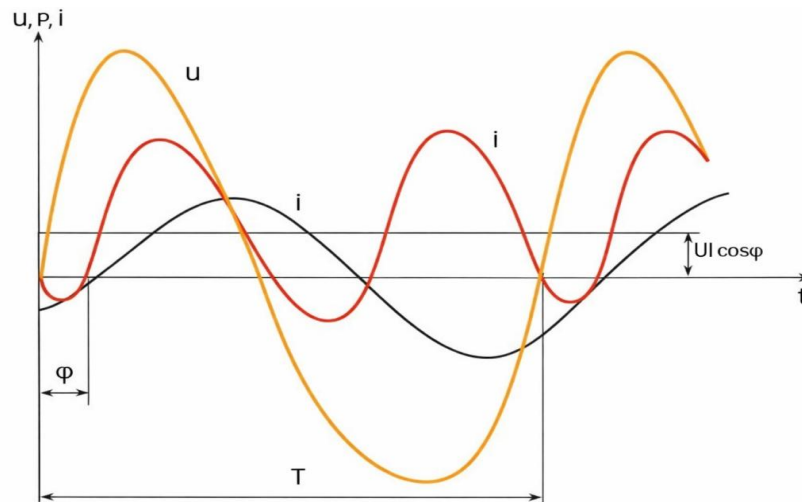


Рисунок 3.1 – Залежності миттєвих значень напруги, струму та активної потужності

Виходячи із рівняння (3.4) та наведених залежностей можна зрозуміти яка частина енергії за період споживається, а яка повертається зворотно назад. Такий процес «повертання» спостерігається при наявності реактивних елементів в колі (ємність та індуктивність), що можуть накопичувати та віддавати енергію приймачам.

Повну потужність можна записати формулою в комплексній формі:

$$S = \dot{U}I^* = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ, \quad (3.5)$$

де \dot{U} – комплекс напруги, В;

I^* – спряжене значення комплексу струму, А;

$UI \cos \varphi$ являє собою активну потужність, $UI \sin \varphi$ реактивну потужність.

Якщо в мережі є переважаючим індуктивний опір, то струм протікає з відставанням по фазі від напруги (реактивна потужність має додатне значення). Якщо в мережі переважає ємкісний опір, то струм випереджає по фазі напругу (реактивна потужність має від'ємне значення).

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Формула реактивного опору для індуктивного характеру:

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.6)$$

Формула реактивного опору для ємкісного характеру:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.7)$$

де f – частота змінного струму, Гц;

L – індуктивність, Гн.

C – електрична ємкість, Ф.

З рівняння (3.5) слідує наступне:

$$\left. \begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ \frac{Q}{P} &= \operatorname{tg} \varphi; \\ \frac{P}{S} &= \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} P &= S \cos \varphi; \\ Q &= S \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3.8)$$

З урахуванням вище сказаного та загальноприйнятих показників $\cos \varphi$ характеризує реактивну потужність. Чим вище значення $\cos \varphi$, тим більше активної потужності у складі повної. За загальноприйнятими нормами він становить $\geq 0,95$ і таке значення має бути на вводах які живлять підприємство.

Необхідність в постачанні і компенсації реактивної потужності обумовлена особливостями роботи електричних мереж змінного струму і характером навантаження цих мереж. Споживачі електроенергії такі як електродвигуни, трансформатори, дроселі, люмінесцентне освітлення являються індуктивними. При їх роботі частина енергії не перетворюється в корисну роботу, а накопичується в магнітних полях і повертаються зворотно назад в мережу. Передача реактивної потужності по повітряним лініям і кабелям через силові трансформатори є збитковою. Серед причин це поява додаткових втрат активної потужності, як в мережі, так і в генераторах електростанцій [4, 19].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p \quad (3.9)$$

де ΔP_a – втрати активної потужності при передачі активної потужності;
 ΔP_p – втрати активної потужності при передачі реактивної потужності.

При цьому, як відмічалось у розділі 2, спостерігаються додаткові втрати напруги:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p \quad (3.10)$$

де ΔU_a – втрати напруги при транспортуванні активної потужності в мережі;
 ΔU_p – втрати напруги при транспортуванні реактивної потужності в мережі;
 R – активний опір мережі;
 X – реактивний опір мережі.

Враховуючи наведене вище, можна стверджувати, що зниження пропускної спроможності системи електропостачання відбувається із-за її завантаження реактивною потужністю, що в свою чергу призводить до необхідності збільшення перерізу проводів, вибору трансформаторів більшої потужності. У зв'язку з цим на підприємстві необхідно впроваджувати заходи, що направлені на оптимізацію рівнів споживання реактивної складової.

На промислових підприємствах досягати даних цілей можливо різними способами:

- оптимізацією режимів роботи електроустановок;
- використанням сучасних електродвигунів та іншого електрообладнання із покращеними експлуатаційними характеристиками;
- використанням засобів компенсації реактивної потужності.

Запровадження і удосконалення засобів та схем компенсації реактивної потужності забезпечують економічний ефект не тільки в місці підключення вузлів системи, а і по всіх елементах енергосистеми, починаючи від джерел генерації до силових трансформаторних підстанцій.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

В якості основного джерела реактивної потужності, яке забезпечує споживачів промислового підприємства реактивною потужністю, понад ту кількість, яку можливо та економічно доцільно отримати від енергосистеми, застосовуються конденсаторні установки (батареї конденсаторів). Вони встановлюються як в мережах з напругою 6-10 кВ, так і в мережах виробничих цехів з напругою 660 та 380 В [18, 20].

Конденсаторні установки (КУ) призначені для генерації реактивної потужності. Сумарна реактивна потужність, що генерується, конденсаторної установки на основній частоті визначається виходячи з умов забезпечення необхідного значення коефіцієнта потужності в режимі максимального споживання реактивної потужності.

Конденсаторна установка може складатися з однієї чи декількох конденсаторних батарей або з одного або декількох окремо встановлених одиничних конденсаторів, приєднаних до мережі через комутаційні апарати.

З метою отримання економічного режиму роботи електричних мереж зі змінним графіком реактивного навантаження використовується автоматичне регулювання потужності конденсаторної установки шляхом включення або відключення її в цілому або використання окремих її частин (ступенів).

Схема з'єднання конденсаторів в батареї визначається техніко-економічною доцільністю і умовами експлуатації. Не допускається тривала робота поодиноких конденсаторів напругою вище номінальної.

Комутація конденсаторних батарей (КБ) зазвичай здійснюється автоматичними вимикачами. Кожне включення супроводжується перехідним процесом, при якому є імпульси струму і перенапруги на фазах мереж, які дорівнюють 1,8 від номінального значення .

При включенні КБ до контактів вимикача прикладається напруга, рівна 2,5 номінального значення фазної напруги. Тому до складу конденсаторних установок можуть входити струмообмежувальні реактори для зниження стрибків струму і захисту від перенапруги.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Батарея конденсаторів і живляча мережа утворюють контур, відносна резонансна частота якого визначається за виразом:

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{K3}}{Q_{KB}}}, \quad (3.11)$$

де S_{K3} – потужність КЗ на шинах живлячої мережі;

Q_{KB} – генеруюча потужність батареї.

При передачі споживачам активної P і реактивної Q потужності в системі електропостачання є втрати активної потужності [4, 19].

Втрати активної потужності можна розрахувати за виразом:

$$\Delta P = 3I^2 \cdot R = \frac{S^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2}{U^2} \cdot R + \frac{Q^2}{U^2} \cdot R = \Delta P_a + \Delta P_p, \quad (3.12)$$

де $\Delta P_a, \Delta P_p$ – втрати, відповідно, активної і реактивної потужностей.

Враховуючи, що коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (3.13)$$

знаходимо ΔP :

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_p = \frac{P^2 R}{U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (3.14)$$

Крім того, передача реактивної потужності по мережі знижує пропускну здатність всіх елементів системи електропостачання.

Найбільшого поширення на промислових підприємствах в якості КУ отримали конденсаторні батареї.

Основні переваги КБ наступні [5]:

- малі питомі втрати активної потужності (0,0025-0,005 Вт/ВАр);
- простота виробництва монтажних робіт (малі габарити, маса, відсутність фундаментів);

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- простота експлуатації (зважаючи на відсутність частин, що обертаються і труться);
- можливість їх установки в центрі реактивних навантажень або біля електроприймачів;
- для установки конденсаторів може бути використане будь-яке сухе приміщення;
- можливість поступового збільшення потужності КБ.

Недоліки КБ:

- залежність реактивної потужності, що генерується, від напруги;
- недостатня міцність, особливо при КЗ і перенапруженнях;
- малий термін служби;
- пожежонебезпечність;
- наявність залишкового заряду;
- перегрів при підвищенні напруги і наявності в мережі вищих гармонік, що ведуть до пошкодження конденсаторів;
- складність регулювання реактивної потужності (РП регулюється ступінчасто).

Потужність трифазної конденсаторної установки, де ємності з'єднані в трикутник (Δ), дорівнює

$$Q_{KB} = 3\omega_{\phi} C_{\phi} U^2, \quad (3.15)$$

де $\omega_{\phi} = 2\pi f_0$ – кругова частота однієї фази;
 C_{ϕ} – сумарна ємність конденсаторів однієї фази;
 U – лінійна напруга.

При з'єднанні зіркою

$$Q_{KB} = \omega_{\phi} C_{\phi} U^2. \quad (3.16)$$

Силкові конденсатори на напругу до 1000 В випускаються в однофазному та трифазному виконанні.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комплектні конденсаторні установки на базі силових конденсаторів, призначені для підвищення і регулювання напруги в розподільних мережах та електроустановках, виготовляються на напруги 0,38; 0,66; 6,3; 10,5; 35; 110 кВ.

Регульовані установки компенсації реактивної потужності призначені для підтримки постійним заданого значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ в електричних розподільних трифазних мережах промислових підприємств та інших об'єктів напругою до 400 В, частотою 50 Гц.

Установки компенсації реактивної потужності забезпечують заданий $\cos \varphi$ в періоди максимальних і мінімальних навантажень, а також виключають режим споживання реактивної потужності.

Для компенсації постійної (незмінної) реактивної потужності випускаються нерегульовані установки компенсації реактивної потужності.

Конденсатори практично ніколи не працюють в строго номінальних умовах з огляду на те, що напруга змінюється в часі залежно від зміни навантаження, крім того, форми кривих напруги і струмів можуть відрізнятися від синусоїдальних. У цьому випадку потужність конденсаторної батареї, що генерується, буде

$$Q_{KB} = \sum_{v=1}^n (U_v)^2 \omega \cdot C_{KB}, \quad (3.17)$$

де v – порядковий номер гармоніки;

U_v – діюче значення напруги цієї гармоніки.

З формули (3.17) видно, що при наявності вищих гармонік діючі значення струму і напруги не дають уявлення про реактивну потужність, однак конденсаторна батарея відчуває навантаження реактивної потужності [14, 18].

$$\frac{Q_{KB}}{Q_{KBном}} = \frac{1}{v+1} \cdot (1,22v + 1,67f_0), \quad (3.18)$$

де $f_0 = 50$ Гц – частота основної гармоніки.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конденсатори, що випускаються промисловістю розраховані на перевантаження, зокрема, повинні допускати тривалу роботу при діючому значенні струму до 1,3 за рахунок струмів вищих гармонік і повинні довго працювати при підвищенні напруги першої гармоніки до 1,1 $U_{ном}$.

Вітчизняні конденсатори для підвищення коефіцієнта потужності електроустановок змінного струму з частотою 50 Гц мають втрати 2-2,5 Вт/кВАр для напруги 6 – 10 кВ і 3,5-4,5 Вт/кВАр для напруги до 1000 В.

В сучасній конструкції конденсаторів, процес заснований на використанні нових ізоляційних матеріалів і просочувальних рідин, що дозволило створити конденсатори з питомими втратами 0,1-0,5 Вт/кВАр [14].

Застосування саме таких конденсаторів робить економічно доцільним підвищення ступеня компенсації реактивної потужності до 1 кВАр/кВт [14].

В цілому, оцінюючи можливість КБ, слід зазначити, що вони характеризуються:

а) залежністю реактивної потужності від потужності батареї, напруги та частоти:

$$Q_{KB} = Q_{KB_{ном}} \cdot k_U^2 \cdot k_f^2, \quad (3.19)$$

де Q_{KB} – генеруюча потужність батареї;

k_U, k_f – відношення напруги при відхиленні напруги і частоти мережі від номінального значення до напруги в номінальному режимі;

б) високою чутливістю конденсаторних батарей до наявності вищих гармонік струму і напруги;

в) недостатньою електричною міцністю.

Завдяки своїм перевагам конденсаторні батареї знайшли в даний час широке застосування в системі електропостачання промислового підприємства в порівнянні з іншими конденсаторними установками.

Для захисту батарей конденсаторів від вищих гармонік використовуються фільтри, в складі яких є реактори.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виходячи з розрахункового навантаження підприємства, наявних джерел реактивної потужності та завдання енергосистеми за реактивною потужністю в години максимуму навантаження, визначається така потужність додаткових джерел – КУ, СТК, при якій витрати на компенсацію реактивного навантаження підприємства виходять найменшими. Тобто

$$Q_{MIN} \leq Q_{KV} \leq Q_{MAX} \cdot \quad (3.20)$$

Введення джерел реактивної потужності призводить до зниження втрат в період максимального навантаження в середньому на 0,081 кВт/кВАр. В даний час ступінь компенсації становить близько 0,25 кВАр/кВт в максимум навантаження. Економічно доцільно встановити ступінь компенсації 0,6 кВАр/кВт.

З точки зору економії електроенергії і регулювання напруги компенсацію реактивної потужності найбільш доцільно здійснювати в місці її споживання.

При виборі засобів компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств необхідно розрізняти за функціональними ознаками дві групи промислових мереж в залежності від складу їх навантажень [14, 18]:

- перша група – мережі загального призначення, мережі з режимом прямої послідовності основної частоти 50 Гц;
- друга група – мережі зі специфічними нелінійними, несиметричними і різко змінними навантаженнями.

Рішення задачі компенсації для другої групи має ряд особливостей, в тому числі необхідність забезпечення показників якості електроенергії у електроприймачів з необхідною швидкістю.

Розміщення КУ в мережах до і вище 1000 В повинно задовольняти умові найбільшого зниження втрат активної потужності від реактивних навантажень.

Встановлювані на шинах низької напруги головних знижувальних підстанцій (ГЗП) підприємства, компенсуючі пристрої забезпечують підтримку коефіцієнта реактивної потужності системи і зменшують потужність силових трансформаторів головної підстанції ТП 150/10.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{тр.розр.} = \sqrt{P_{розр.}^2 + (Q_{розр.} - Q_{нк})^2}, \quad (3.21)$$

де $P_{розр.}$ та $Q_{розр.}$ – розрахункові активна і реактивна потужності підприємства;

$Q_{нк}$ – потужність пристрою компенсації.

У мережах низької напруги (до 1000 В) на промислових підприємствах, до яких підключається велика частина приймачів електроенергії, які споживають реактивну потужність, коефіцієнт потужності навантаження знаходиться в межах 0,7-0,8. При цьому мережі 380-660 В електрично більш віддалені від джерел живлення. Тому для зниження витрат на передачу реактивної потужності, пристрої компенсації розташовують безпосередньо в мережі до 1000 В.

При централізованій компенсації КБ встановлюють на шинах низької напруги цехових трансформаторних підстанцій ТП 380 В і 660 В (КУ1). В цьому випадку знижується навантаження трансформаторів ТП і струмоведучих елементів розподільних пристроїв низької напруги, а регулювання напруги здійснюється відразу у всій мережі.

При груповій компенсації (КУ2) – з приєднанням конденсаторів до розподільних пунктів мережі (шафи, шинопроводи). При цьому розподільна мережа до електроприймачів не завантажується від протікання реактивної потужності, але ефективніше використовується батареї конденсаторів.

Індивідуальна компенсація (КУ3) – з приєднанням конденсаторів наглухо до затискачів електричного приймача рисунок 3.2.

У цьому випадку від реактивних струмів розвантажується вся мережа системи електропостачання. Перевага індивідуальної компенсації полягає в тому, що конденсатори автоматично вмикаються і вимикаються синхронно з навантаженням. Цей вид компенсації застосовується найчастіше на напругу до 1000 В.

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

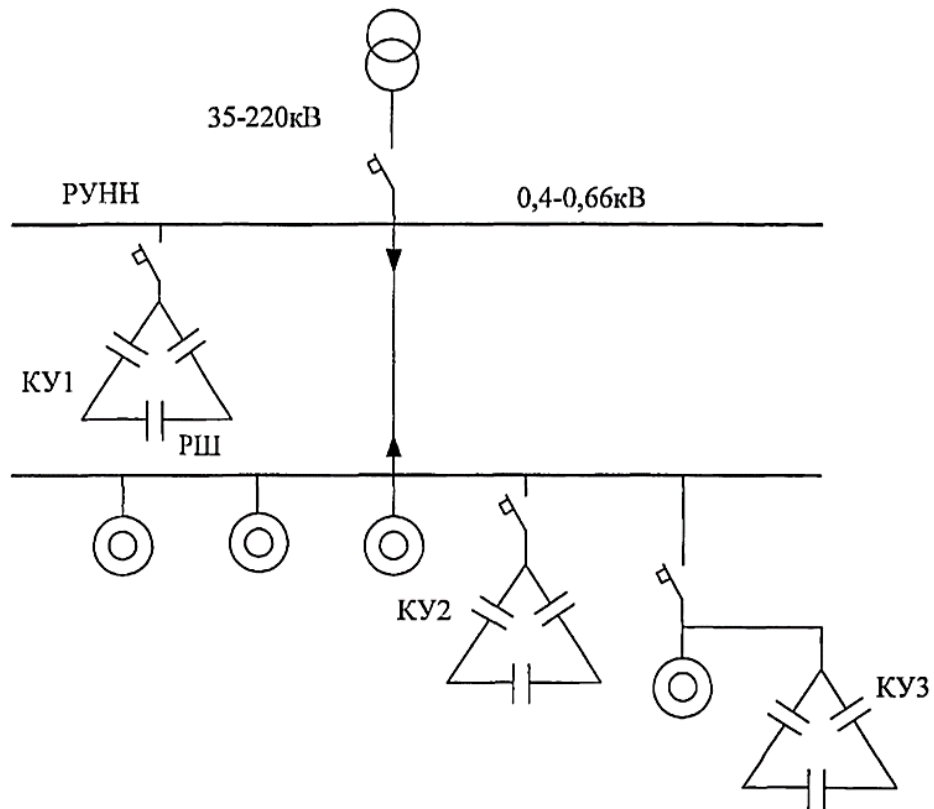


Рисунок 3.2 – Установка КБ у цеховій мережі

Однак це означає, що застосування індивідуальної компенсації виправдано, тільки якщо вона застосовується в пристроях і установках з дуже хорошим коефіцієнтом навантаження.

При регулюванні напруги за рахунок зміни потоків реактивної потужності одночасно відбувається зниження втрат потужності. Зниження цих втрат буде залежати від ступеня компенсації реактивної потужності навантаження компенсуючими пристроями.

Якщо мережу підприємства представити у вигляді еквівалентного опору R_e , і навантаження P_e і Q_e , то втрати потужності в такій мережі будуть рівні [4]:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_e}{U} \right)^2 + \left(\frac{Q_e}{U} \right)^2 \right] \cdot R_e = \Delta P' + \Delta Q', \quad (3.22)$$

де $\Delta P'$ – втрати від передачі активної потужності;

$\Delta Q'$ – втрати від передачі реактивної потужності.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

$$\Delta U \cong \frac{Q_{KY} \cdot X_T}{U_{2ном}}, \quad (3.23)$$

де $U_{2ном}$ – номінальна напруга на вторинній стороні цехового трансформатора;

X_T – індуктивний опір трансформатора.

Відповідно з втратами потужності з'являються і втрати електричної енергії.

$$\Delta W = \Delta P \cdot \Delta t, \quad (3.24)$$

де Δt – час, протягом якого споживається електрична енергія.

Таким чином, з огляду на вищесказане, джерела реактивної потужності в системі електропостачання промислового підприємства, які використовуються для регулювання напруги, можуть бути розташовані так, як це показано на рисунку 3.3, і очевидно, що для цехових мереж найбільш доцільно використовувати в цілях регулювання напруги конденсаторні батареї.

Так як навантаження підприємства, як і навантаження окремих цехів, змінюється протягом доби, тобто змінюється за часом споживання активної та реактивної потужності, то при підключенні компенсуючої нерегульованої конденсаторної батареї не вдається повністю уникнути втрат електричної енергії в системі електропостачання.

Для забезпечення найбільш економічних режимів систем електропостачання, що характеризуються нерівномірним графіком добового споживання реактивної потужності, доцільним є регулювання потужності компенсуючих пристроїв.

Режим роботи компенсуючих пристроїв встановлюють в залежності від параметрів, що забезпечують найбільш економічне рішення, при дотриманні допустимих відхилень напруги на затискачах приймачів електроенергії.

В якості параметрів управління можуть використовуватися напруга, струм навантаження, величини, що характеризують реактивне навантаження, час.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

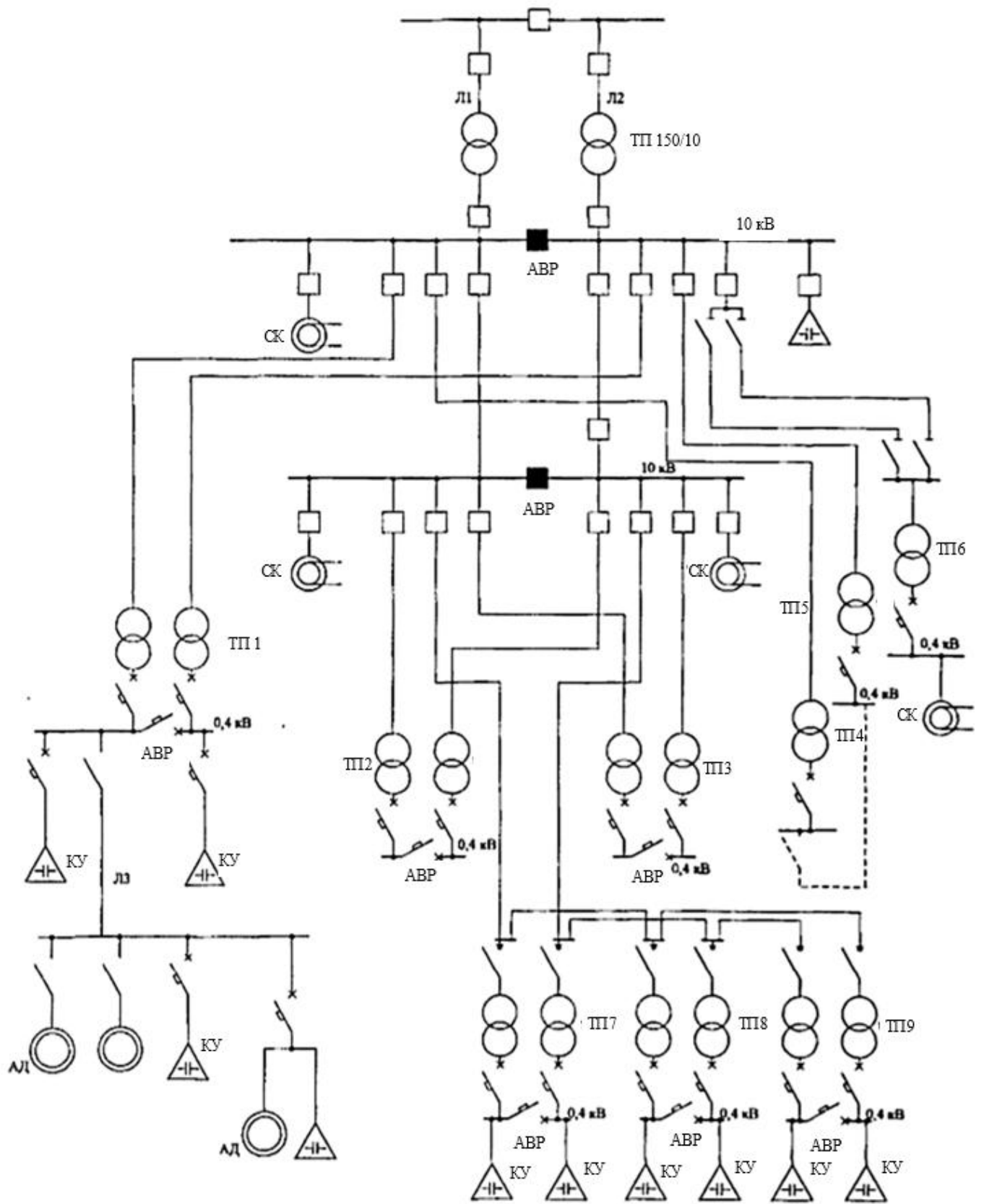


Рисунок 3.3 – Розміщення КУ в системі електропостачання підприємства

										Арк.
										68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ					

3.2 Аналіз схем пристроїв компенсації реактивної потужності

При використанні пристроїв компенсації в мережах електропостачання промислових підприємств зміна напруги відбувається за рахунок регулювання їх реактивної потужності.

$$U_2 = U_1 - \frac{P_m r_m + (Q_m \pm Q_{ПК}) x_m}{U_2}, \quad (3.25)$$

де U_1 – напруга на початку окремої ділянки системи електропостачання;

U_2 – напруга в точці встановлення пристрою компенсації;

$Q_{ПК}$ – реактивна потужність пристрою компенсації.

У статичних тиристорних компенсаторах (СТК) застосовуються регульовані реактори паралельно із батареєю конденсаторів, які можуть бути регульованими і нерегульованими [21].

Відомі способи регулювання напруги за рахунок зміни потоків РП пов'язані із забезпеченням її балансу в електричних мережах. Регулювання напруги у вузлах розподільної електричної мережі підприємства, цехових мережах і безпосередньо на затискачах електро приймачів виконується за рахунок зміни втрат напруги в елементах електричної мережі в основному шляхом регулювання потоків реактивної потужності.

Генерування на електричних станціях та перетікання магістральними електричними мережами додаткових обсягів реактивної потужності призводить до додаткових втрат активної потужності.

$$\Delta P = 3I^2 \cdot r = \frac{S^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2}{U^2} \cdot r + \frac{Q^2}{U^2} \cdot r = \Delta P_a + \Delta P_p.$$

При цьому втрати в синхронних генераторах електричних станцій, що живлять енергосистему, залежать від обсягу генерованої ними реактивної потужності [19]:

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_n} Q + \frac{D_2}{Q_n^2} Q^2, \quad (3.26)$$

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де D_1 та D_2 – постійні для певного типу синхронного генератора, які залежать від його номінальної потужності та коефіцієнта корисної дії;

Q_n – номінальна реактивна потужність генератора;

Q – поточне значення реактивної потужності генератора.

Наприклад, для синхронного генератора Т-2-50-2, що генерує реактивну складову $Q_n = 31$ МВар, збільшення реактивної потужності на 20 %, з метою регулювання рівня напруги в електричній мережі, призведе до збільшення втрат реактивної потужності на 35%. При цьому майже на 20% зменшується обсяг активної потужності, що генерується на електростанції [19].

Також додаткові втрати активної потужності, що пов'язані із циркуляцією (перетіканням) електричними мережами реактивної потужності характерні і для підвищувальних і знижувальних трансформаторів, шунтувальних реакторів, синхронних компенсаторів, тощо [4, 19]. Усі наведені фактори призводять до збільшення втрат активної потужності і її недовідпуску з шин генераторів підстанцій.

Підключення батарей конденсаторів (БК) до шин навантаження з метою компенсації реактивної потужності призводить як до зменшення втрат електроенергії, так і до погіршення стійкості системи. На рисунку 3.4 наведено залежності $Q=f(U)$ до (крива 1) і після включення БК (крива 2) [19].

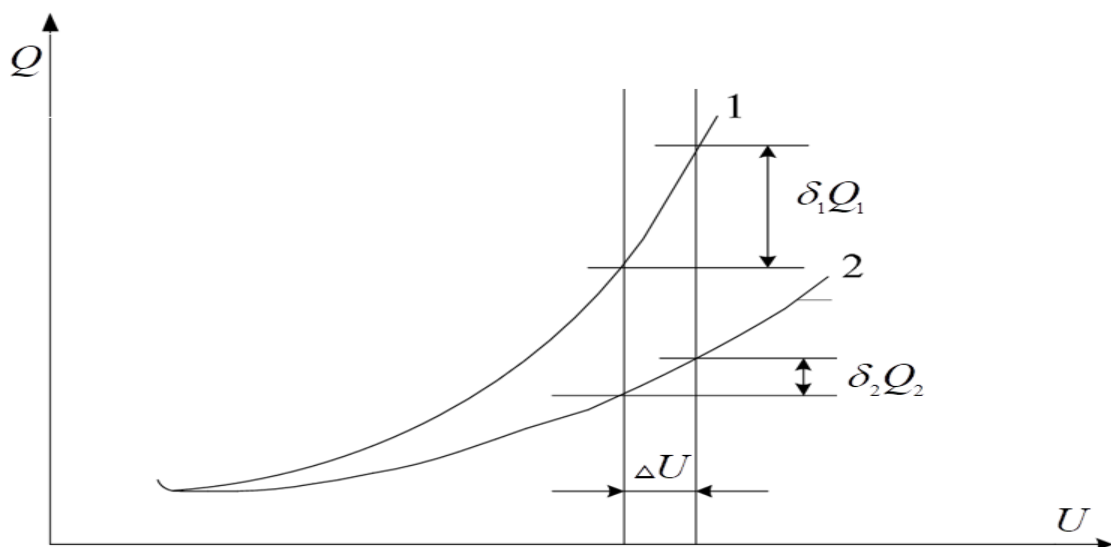


Рисунок 3.4 – Залежність $Q = f(U)$ до (1) та після (2) підключення БК

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Із залежностей, що наведені на рисунку 3.4, видно, що після ввімкнення БК, відбувається деформування характеристики $Q = f(U)$ (крива 2). Вона стає більш пологою, при цьому запас стійкості системи зменшується, тому що у складі навантаження з'являється від'ємний складник.

З цього випливає, що при компенсації реактивної потужності з метою зменшення втрат електричної енергії в системі електропостачання підприємства, необхідно передбачати регульовані джерела реактивної потужності для коригування характеристики $Q = f(U)$. У вузлах системи необхідно підтримувати задані співвідношення між активною і реактивною потужністю ($\text{tg } \varphi$) [4, 19].

Найбільш дешевими та зручними для застосування в електричних мережах промислових підприємств є схеми на основі конденсаторних батарей.

Електричні схеми пристроїв компенсації на базі конденсаторних батарей досить різноманітні [14, 18, 22]. Розглянуто ті, які було застосовано в системі електропостачання промислових підприємств, і які є перспективними.

На рисунку 3.5 представлена схема нерегульованого пристрою компенсації, в якому конденсатори з'єднані за схемою трикутника (рідше в зірку) і постійно підключені на шини розподільчих пристроїв або трансформаторних підстанцій [4].

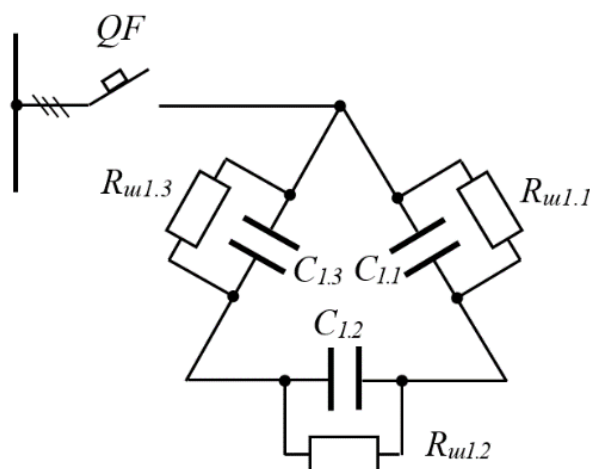


Рисунок 3.5 – Схема нерегульованого компенсуючого пристрою

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Для захисту конденсаторних батарей від перевантаження і коротких замикань використовується автоматичний вимикач QF або роз'єднувач з запобіжником. Шунтуючі опори ($R_{ш}$) служать для розряду конденсаторів при відключенні конденсаторних батарей.

Ця конденсаторна установка є найпростішим, втрати потужності в ньому мінімальні, оскільки визначаються тільки втратами в конденсаторах:

$$\Delta P = 2\pi \cdot f \cdot C_{KB} \cdot U_{ном}^2 \cdot tg\delta, \quad (3.27)$$

де f – частота мережі;

C_{KB} – ємність конденсаторної батареї;

$U_{ном}$ – номінальна напруга КБ;

$tg\delta$ – тангенс кута втрат в конденсаторах, Вт/кВАр.

Однак втрати потужності (ΔP) в електричній мережі промислового підприємства при такому пристрої компенсації – максимальні [4].

Схема з регульованою ємністю з перемиканням конденсаторів з трикутника на зірку, рисунок 3.6. В цьому випадку компенсуючий пристрій має дві нерівномірні ступені реактивної потужності.

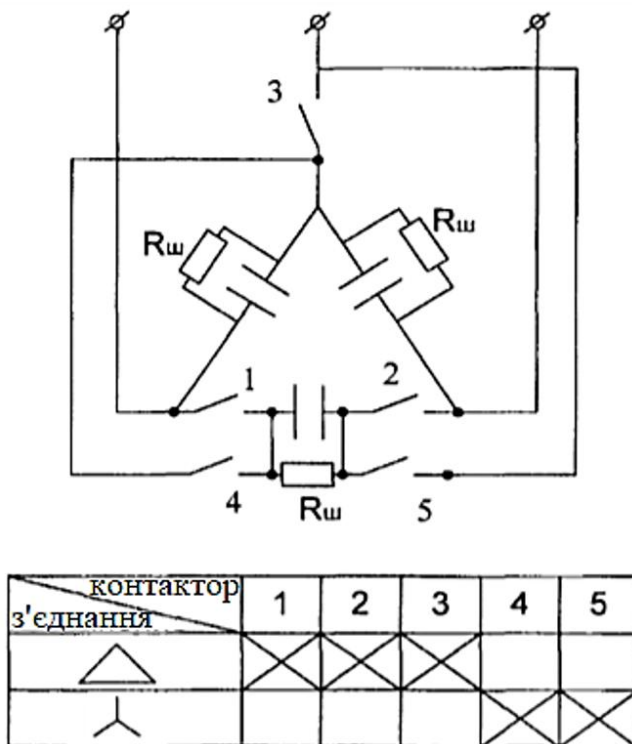


Рисунок 3.6 – Схема з регульованою ємністю

Схема «трикутник» відповідає потужності $Q_{ПКmax}$, а в схемі «зірка» – $Q_{ПКmin}$.
 При з'єднанні зіркою

$$Q_{KB} = C\omega U_{\phi}^2. \quad (3.28)$$

При з'єднанні (Δ), тобто $Q_{KB}(\Delta)$ в 3 рази більше ніж при з'єднанні в зірку:

$$Q_{KB} = 3C\omega U_{\phi}^2. \quad (3.29)$$

Перемикання з однієї схеми на іншу здійснюється або контактами, або тиристорними ключами. З одного боку, це проста схема компенсуючого пристрою, з іншого боку, при ній втрати енергії від реактивної потужності в заводській мережі електропостачання.

До недоліків схеми рисунку 3.6 слід віднести відносно велике число апаратів і складність комутації конденсаторів.

При великих потужностях навантажень і їх нерівномірному графіку використовують пристрої компенсації з регулюванням реактивної потужності за рахунок переключення конденсаторів ступенями (рисунок 3.7) [4].

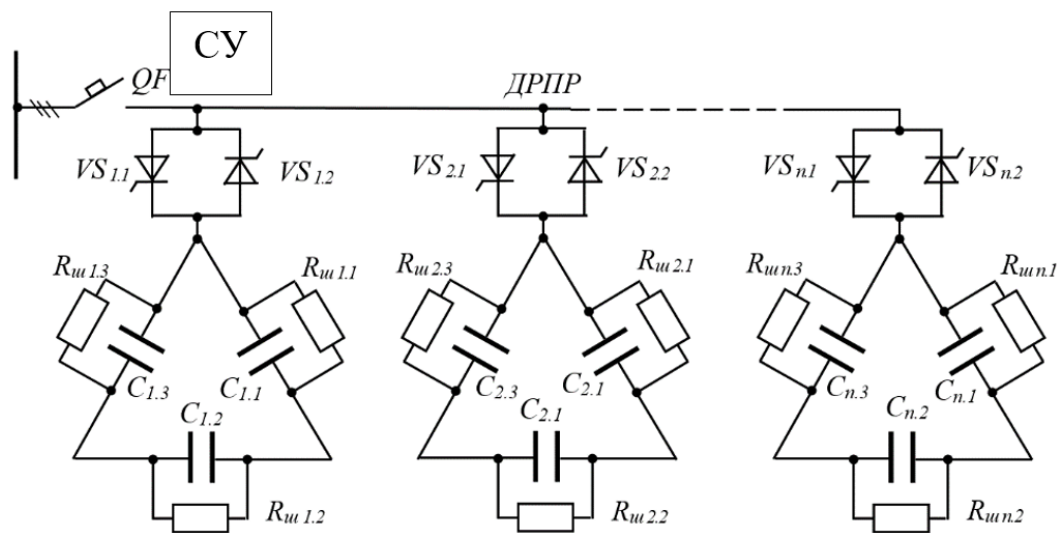


Рисунок 3.7 – Схема джерела реактивної потужності зі ступінчастим регулюванням

Включення і відключення ступенів може здійснюватися або тиристорними ключами, або контакторами. Як показує досвід експлуатації

таких пристроїв, контактори конденсаторів швидко виходять з ладу, тобто контактори витримують тільки 200-300 перемикань. Пояснюється це великими ударними струмами, який є при підключенні одного ступеня конденсаторів до іншого. Значення ударного струму визначається перехідним опором замикаючих контактів і початковою напругою на ємностях. Найгірший випадок, коли напруги на ємностях знаходяться в протифазі, і в цьому випадку в місці перехідного контакту виділяється енергія, рівна

$$W = \frac{(2U_{\max})^2 \cdot C_{КБ}}{2}. \quad (3.30)$$

Це викликає розплавлення металу контактів і викид його крапель у вигляді іскор. Це призводить до інтенсивного руйнування контактів.

У разі застосування тиристорного ключа також виникає ударний струм, який слід обмежувати, так як тиристори допускають тільки певне значення швидкості наростання струму [14].

Зазвичай обмеження струму досягається за рахунок включення послідовно з тиристорними ключами індуктивності, значення якої може бути визначено за виразом:

$$L = \frac{2U_{\max}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{дон}}}, \quad (3.31)$$

де U_{\max} – максимальне значення напруги на конденсаторах.

Чим більше ступенів регулювання у такого компенсуючого пристрою, тим вище його ефективність, але ускладнюється система управління.

Розглянуті вище КУ дозволяють регулювати потужність тільки ступінчасто. Для плавного регулювання потужності використовують пристрої компенсації, в яких нерегульована батарея конденсаторів включена паралельно з реактором (рисунок 3.8) [4].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

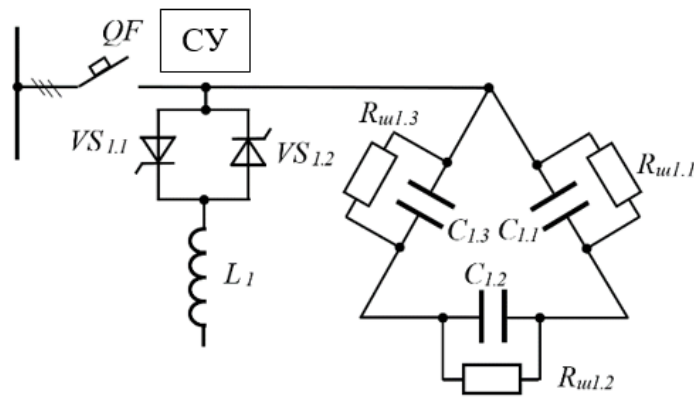


Рисунок 3.8 – Схема статичного тиристорного компенсатора (СТК) з регульованою індуктивністю (тиристорно-реакторна група)

За рахунок фазного регулювання тиристорів, включених послідовно з реактором, реактивна потужність останнього Q_L плавно змінюється. Такий пристрій, як в закордонній, так і у вітчизняній літературі, отримало назву СТК (статичний тиристорний компенсатор) [4].

У СТК реактивна потужність, що генерується пристроєм, буде дорівнювати:

$$Q_{нк} = Q_L - Q_C, \quad (3.32)$$

де $Q_{нк}$ – реактивна потужність на виході СТК;

Q_L – реактивна індуктивна потужність;

Q_C – реактивна ємнісна потужність.

На рисунку 3.9 приведена одна зі схем, де паралельно включені реактор і конденсаторна батарея із ступінчастим регулюванням ємностей.

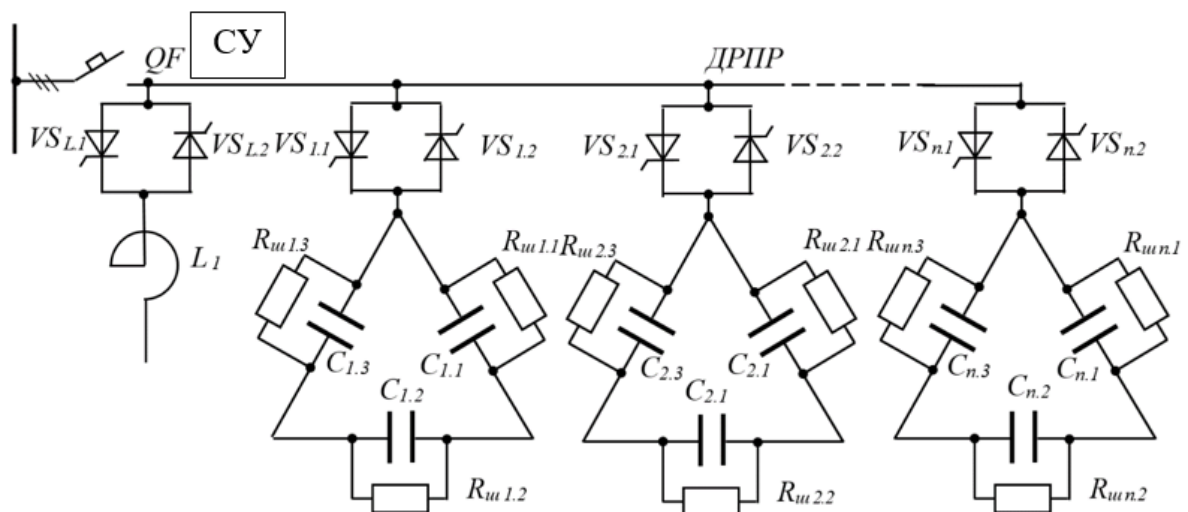


Рисунок 3.9 – Схема СТК з регульованою індуктивністю та ємністю (ступінчастою)

У цьому випадку можливі два принципово різних режиму роботи пристрою. У першому режимі регулювання потужності здійснюється ступенями, а потужність реактора L дорівнює половині потужності ступені конденсаторів. Спочатку включаються одночасно перший ступінь конденсаторів і реактор, далі реактор відключається і другий ступінь регулювання реактивної потужності, потім підключається наступна ступінь конденсаторів і реакторів, яка далі знову відключається. Таким чином, число ступенів регулювання збільшується в два рази в порівнянні з числом ступенів конденсаторної батареї. Схема дозволяє здійснювати достатнє регулювання реактивної потужності при відносно малій потужності реактора Q_L і, отже, втрати енергії в ньому невеликі.

Потужність реактора з урахуванням втрати N ступенів дорівнює:

$$Q_L = \frac{Q_{KV \max}}{2N}. \quad (3.33)$$

У другому режимі потужність реакторів L дорівнює потужності одного ступеня конденсаторів і змінюється за допомогою тиристорного регулятора. У такій схемі забезпечується плавне регулювання реактивної потужності, необхідна швидкодія, а також потужність реакторів в N раз менше значення вищих гармонік струму, що генеруються тиристорами.

Статичні тиристорні компенсатори для промислових підприємств вирішують задачу компенсації реактивної потужності і одночасно підтримують параметри якості напруги відповідно до ДСТУ EN 50160:2014 [13].

Так як ємності фільтро-компенсуючого пристрою одночасно є джерелами реактивної потужності і їх не можна регулювати ступенями, то при змінах навантаження в меншу сторону відбувається перекомпенсація, що призводить як до збільшення втрат енергії в мережі живлення, так і значного підвищення рівнів напруги.

Застосування регульованих реакторів за допомогою тиристорного блоку управління дозволяє уникнути цього. Враховуючи, що процес зміни навантаження, наприклад, дугових електричних печей відбувається дуже

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидко і навантаження неоднакові по фазах, то такі джерела реактивної потужності виконуються окремо на кожен фазу і є швидкодіючими.

3.3 Удосконалення системи компенсації реактивної потужності в мережі цеху графітації №4

3.3.1 Компенсація реактивної потужності печей графітації

В умовах нестачі і збільшення вартості енергетичних ресурсів, зростання обсягів усього виробництва і інфраструктури міст усе більш гострою стає проблема енергозбереження і зокрема, економії електроенергії.

Паралельно з економією електроенергії останнім часом гостро стоїть питання підвищення її якості, оскільки вирішення цього питання може істотно впливати на витрату електроенергії, надійність систем електропостачання, технологічний процес виробництва.

Оскільки найбільшим споживачем електричної енергії на підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» є електричні печі графітації, то впровадження заходів підвищення ефективності електроспоживання саме цього обладнання є економічно доцільним.

Головною особливістю печей графітації є їх живлення – від одного трансформатора живиться не одна піч, а група печей (секція із шести печей). Ця особливість ставить вимогу безперервної роботи трансформатора при періодичній роботі печей. Знаходження печей графітації під струмом триває 20-120 годин.

Під час процесу графітації до головного шинного пакету підключена лише одна піч. У інших печах секції в цей момент може вироблятися або завантаження електродів в піч, або навпаки їх вивантаження з печі, або електроди просто можуть перебувати в печі для їх охолодження після процесу графітації.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Електричну мережу, яка пов'язує трансформатор з піччю графітації, називають короткою мережею печі графітації.

На противагу керну печі, коротка електрична мережа володіє незначним активним, але великим реактивним опором, внаслідок чого впливає на коефіцієнт корисної дії та електричні характеристики печі як приймача електричної енергії [23, 24].

По коротких мережах електропечей протікають великі струми і характеризуються великою масою провідників та складністю конфігурації, причому їх експлуатація протікає у важких умовах.

Великі струми зумовлюють появу навколо провідників сильних магнітних полів. Більшість явищ, з якими в звичайних силових мережах не рахуються внаслідок їх незначності, тут набувають великого значення [24].

Високий реактивний опір короткої мережі призводить до великого спаду напруги між трансформатором і піччю, а також до завантаження мережі великою реактивною потужністю.

Основними умовами, яким повинна задовольняти коротка мережа печі, є: найменша довжина, рівність контурів фаз, найменша площа, що охоплюється контуром фази, правильний вибір провідників (з урахуванням умов їх роботи) і раціональне використання їх перетину, найбільш раціональна транспозиція провідників, яка переслідує мету рівномірного завантаження їх струмом.

Дотримання цих умов дозволяє потужність, що отримується з живлячої мережі, використовувати з високим коефіцієнтом корисної дії та високим коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi$).

Електричні параметри короткої мережі впливають на трансформатор не менш, ніж конструктивні розміри печі, визначаючи разом з ними діапазон робочої напруги. Тому при виборі пічного трансформатора, конденсаторної установки необхідно добре знати електричні параметри короткої мережі [24].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крива потужності зростає до деякого максимуму, після якого потужність зменшується. Одночасно знижується активний опір печі і коефіцієнт потужності.

Зменшення потужності після досягнення критичної точки залежить перш за все від різкого зниження активного опору печі. Однак на зниження потужності в великій мірі впливають електричні характеристики контуру печі активний та реактивний опір, що визначають і коефіцієнт потужності, і граничні активні потужності.

Після досягнення максимальної потужності сила струму також набуває максимального значення, отже, потужність надалі майже не змінюється. А так як активний опір печі продовжує знижуватися, то знижується і активна потужність печі.

Коефіцієнт потужності, близький до одиниці на початку кампанії, а в кінці падає до 0,5, а іноді і нижче. Це пояснюється високим реактивним опором печі, а найголовніше, різким зменшенням активного опору керна і, отже, всієї пічної установки [24].

Тому для поліпшення якості графітації та якості електроенергії до головного шинного пакету печі підключена конденсаторна установка через два компенсаційних трансформатора. Такий спосіб підключення конденсаторної батареї дозволяє розвантажити головний шинний пакет, пічний трансформатор і високовольтну мережу від реактивної складової струму і підвищити $\cos \varphi$.

Компенсація реактивної потужності промислових споживачів електричної енергії є найбільш ефективним способом зниження втрат електроенергії, одним із засобів регулювання напруги в електричних мережах, підвищення їх пропускної спроможності та економії паливно-енергетичних ресурсів.

Одним з ефективних шляхів доцільного використання електроенергії і підвищення техніко-економічних показників роботи електроустаткування є компенсація реактивної потужності.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Правильна компенсація реактивної потужності дає ряд переваг, таких як:

- вивільнення додаткової потужності трансформаторів за рахунок зниження реактивної і, як наслідок, повної потужності;
- зменшення втрат, що викликані активною складовою струму (за рахунок зменшення фазних струмів в мережах споживача);
- використання меншого перерізу кабелів електричної мережі;
- збільшення термінів служби електроустаткування за рахунок зниження навантажень і нагріву;
- економія при оплаті за електроенергію;
- поліпшення якості електроенергії – стабільний рівень напруги;
- зменшення аварій на електроустановках споживача;
- зменшення рівня гармонік у мережі.

Оптимальна компенсація реактивної потужності призводить до зменшення втрат потужності, забезпеченню необхідної якості споживаної електроенергії за рахунок зміни рівня напруги в електромережах, досягненню високих техніко-економічних показників роботи електроустановок.

3.3.2 Модернізація схеми компенсації реактивної потужності цеху

Проведений у розділі 1 аналіз електроспоживання виявив, що найбільші обсяги споживання електричної енергії припадають на цех графітації №4, де виконується остаточна обробка продукції підприємства – графітація. Графітація виконується у печах опору, які мають високий реактивний опір, а отже споживають-генерують значні обсяги реактивної потужності. Для компенсації реактивної потужності на даний час в цеху використовуються батареї конденсаторів, ємність яких змінюють оператори вручну протягом протікання технологічного процесу (до 120 годин). Пропонується модернізувати технологію компенсації реактивної потужності.

Виконаний аналіз схем пристроїв компенсації (п. 3.2) показав переваги та недоліки існуючих на даний час схем. Необхідно розробити схему яка б

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для запропонованого РДРП необхідно мати конденсаторну батарею із трьома ступенями C_1 , C_2 та C_3 . Конденсатори кожного ступеня з'єднані в «трикутник» та підключені до мережі через реактор обмеження струму L_0 і тиристорні ключі VS , що забезпечують задану швидкість регулювання та покращують перехідні процеси під час комутації [4].

Параметри реакторів обмеження струму, що сприяють зменшенню впливу струму навантаження на форму кривої вихідної напруги вибирають за виразом:

$$L_0 = \frac{(U_{1\max} + U_{2\max})1,1}{di / dt} K_{зан.}, \quad (3.34)$$

де $U_{1\max}$ – максимальна амплітудна напруга мережі;

$U_{2\max}$ – максимальна амплітудна напруга на затискачах ємності;

$K_{зан.}$ – коефіцієнт запасу (1,1-1,2);

di / dt – швидкість наростання струму.

Протягом кожного півперіоду від блоку керування (БК) керуючі імпульси подаються на тиристорні ключі VS , при цьому автоматично підключається КБ у момент, коли напруга на затискачах конденсатора дорівнює напрузі мережі.

Особливістю запропонованого РДРП є те, що реактори L_1 , що приєднані послідовно із тиристорними регуляторами VS_4 , з'єднані в «трикутник». При такій схемі третя гармоніка струму, що з'являється в електричній мережі при роботі тиристорних регуляторів практично зникає, а точніше вона зменшується в 4-5 разів.

Також особливістю цього РДРП є те, що регулювання реактивної потужності здійснюється за власним законом регулювання невеликими ступенями від цифрової системи керування (БК). За рахунок зміни кута відкривання тиристорних регуляторів VS_4 можна отримати 4 ступені реактивної потужності, що споживається реакторами L_1 – 25, 50, 75 та 100%. Ступені КБ підключаються послідовно [4].

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основною функцією даного РДРП є регулювання напруги в електричній мережі промислового підприємства, при цьому РДРП генерує або споживає РП. Це дозволяє отримати нормовані показники якості електроенергії в мережі підприємства та звільнити мережу живлення від перетікання реактивної потужності і, відповідно, зменшити втрати активної потужності в мережі [4].

3.3.3 Система керування вентильними перетворювачами в схемі регульованого джерела реактивної потужності

Цифрова система керування (ЦСК) виконується на основі інтегральних мікросхем і відрізняється високою надійністю, не вимагає налагодження, і характеризується відсутністю похибок.

Вентильні перетворювачі часто включаються в комплекси промислових установок, управління якими здійснюють цифрові ЕОМ. Сполучення з ЕОМ цифрової системи управління здійснюється краще, ніж системою управління, побудованої на аналогових елементах.

Цифрова система керування вентильним перетворювачем, по суті, виробляє в цифровій формі код фази керуючих імпульсів тиристорів і потім перетворює його у фазу керуючих імпульсів.

На рисунку 3.11 зображено структурну схему цифрової системи управління вентильного перетворювача.

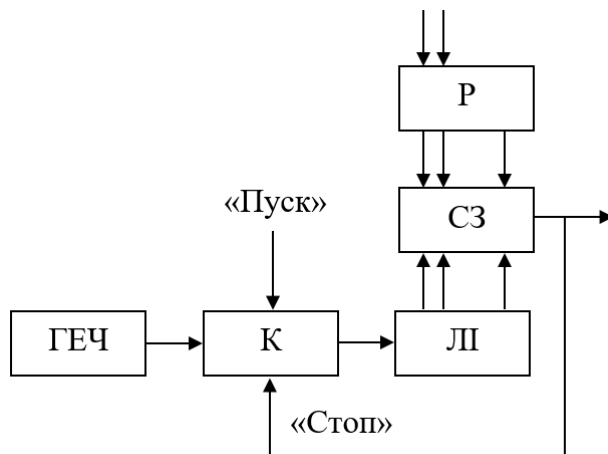


Рисунок 3.11 – Структурна схема перетворювача цифровий код - фаза

					21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

Цифровий код фази керуючих імпульсів (код кута керування α), що надходить до запам'ятовуючого пристрою, записується в реєстр (Р).

У момент часу, коли на аноді відповідного тиристора з'являється позитивна анодна напруга, (тобто, в момент природної комутації і $\alpha = 0$), за сигналом «Пуск» відкривається ключова схема (К) і лічильник імпульсів (ЛІ) починає рахувати імпульси, що надходять від генератора еталонної частоти (ГЕЧ) – сигнал «Пуск» буде синхронізований з мережею живлення.

Число імпульсів в лічильнику (ЛІ) рахується в тому ж коді, в якому представлена цифра в реєстрі (Р). У разі рівності числа імпульсів в лічильнику з числом імпульсів в реєстрі схема збігу (або порівняння) (СЗ) видає імпульс, фаза якого (відносно моменту часу $\alpha = 0$) буде пропорційна числу імпульсів, записаному в реєстрі (Р), а отже, і числу імпульсів в лічильнику (ЛІ).

Вихідний імпульс схеми збігу (СЗ) закриває ключову схему (К) за входом «Стоп», і рахунок імпульсів припиняється. При цьому лічильник імпульсів (ЛІ) встановлюється в початкове положення, і схема готова до наступного циклу перетворення.

Найбільш досконалі СК будуються на основі вертикального принципу керування. Цей спосіб керування лежить в основі сучасних цифрових фазозсувних пристроїв (ФЗП).

У цифрових СК відбувається обробка сигналів, заданих не у вигляді напруги чи струму, а у вигляді кодів. Керуючий сигнал у вигляді n – розрядного коду, може приймати 2^n значень.

Для забезпечення роботи силової схеми регульованого джерела реактивної потужності розроблена система керування (рисунок 3.12), що складається з двох різних систем управління.

Цифрова система дозволяє по черзі підключати три ступені конденсаторної установки ($C1$, $C2$ і $C3$), використовуючи компаратори.

Перетворений керуючий сигнал (U_{IN1}) надходить на вхід трьох компараторів, кожен з яких порівнює його зі своїм заданим сигналом, коли миттєві значення цієї напруги стають рівними і їх різницю змінює полярність, відбувається формування імпульсу керування. Дані імпульси надходять на керуючі електроди тиристорів $VS1$.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

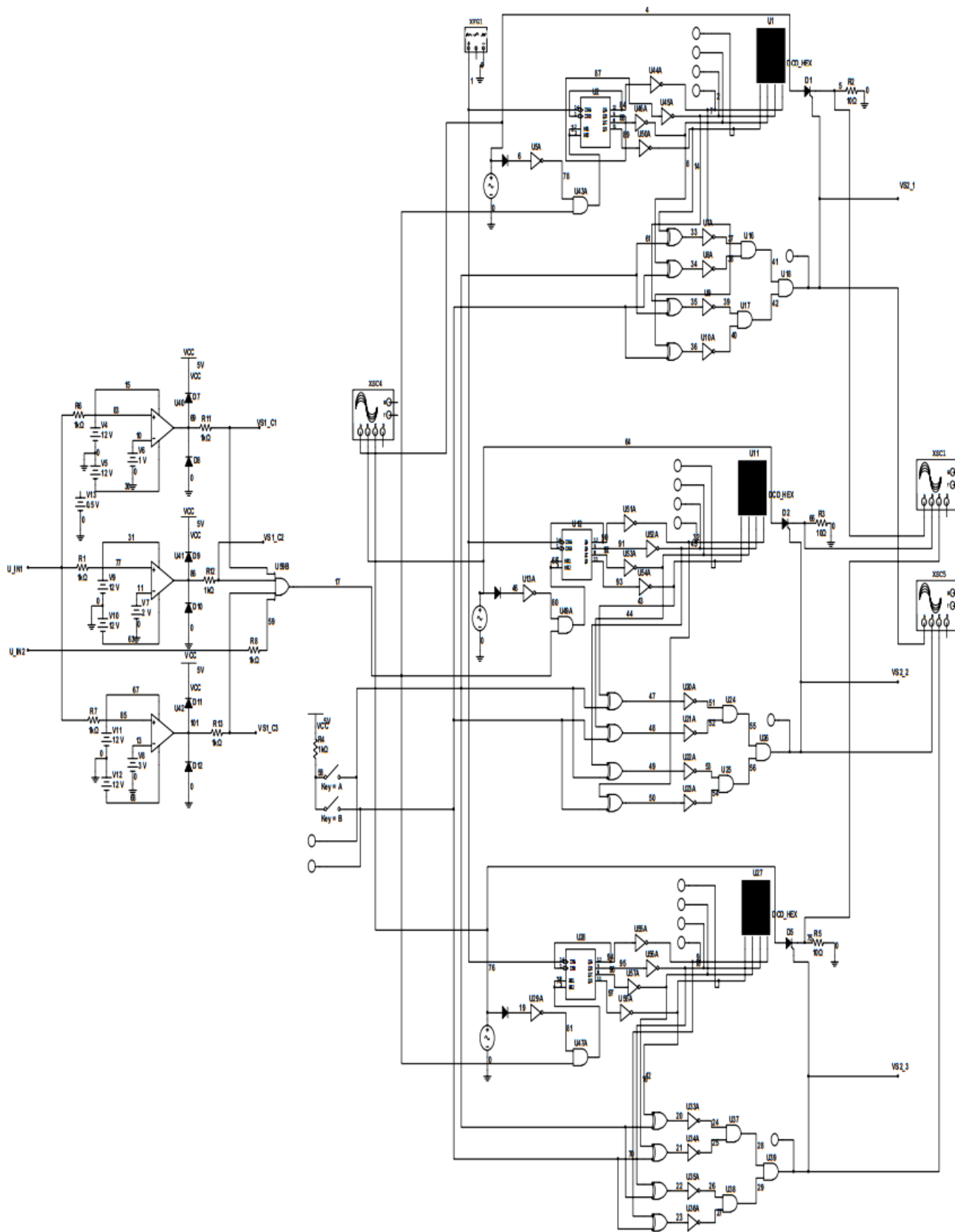


Рисунок 3.12 – Схема керування регульованого джерела реактивної потужності

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

21БЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ

Арк.

85

Таким чином, різні рівні заданих сигналів (постійної напруги) дозволяють послідовно підключати або відключати окремі ступені пристрою компенсації (ПК) по досягненню керуючого сигналу певного значення.

Централізована система керування дозволяє змінити кут відкриття тиристора VS2 (рисунок 3.10) щодо анодної напруги (від моменту природної комутації) в регулюючій схемі, що дозволяє плавно регулювати реактивну потужність при змінному навантаженні в системі електропостачання підприємства.

Робота системи керування тиристором VS2 відбувається наступним чином: спочатку формування опорного коду відповідає моменту природної комутації вентиля силової частини перетворювача. Цей момент фіксується вузлом синхронізації, на вхід якого подають напруга в електромережі.

При зміні знаку напруги живлення, коли на аноді відповідного тиристора з'являється позитивна анодна напруга, вузол синхронізації, що складається з трансформатора, діода і логічного інвертора, видає на установчий вхід лічильника одиничний сигнал, і в лічильнику миттєво записується максимальний опорний код (1111).

У ЦСК зазвичай використовується лінійна форма опорного сигналу, якому відповідає зміна опорного коду $K_{on}(t)$ від значення 0000 до значення 1111.

Опорний код приймає 2^n значення. Він формується віднімальним лічильником до входу «-1» до якого підключений мультивібратор.

Прямокутні імпульси, що формуються мультивібратором, викликають зменшення коду лічильника на одиницю.

Керуючий 2-х розрядний код при цьому приймає 4 значення і подається порозрядно на цифрову схему порівняння (ЦСП) у вигляді паралельного 4-х розрядного коду K_y . (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Відповідність 2-х розрядного коду 4-х розрядному коду

2-х розрядний код	4-х розрядний код
00	0000
01	0101
10	1010
11	1111

Таким чином, отримані 4 ступені регулювання (відповідають куту відкриття тиристора $VS2$) від -25 кВАр до 0 кВАр при відсутності підключення КУ; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї КУ ($C1$); від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох КУ ($C1, C2$); від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок ($C1, C2$ і $C3$), (рисунк 3.13).

Цифрова схема порівняння (ЦСП) фіксує порозрядну рівність керуючого і опорного кодів. При цьому на виході ЦСП формується одиничний логічний сигнал. Цей сигнал надходить на керуючий електрод тиристора $VS2$.

Запропонована цифрова система керування реактивною потужністю забезпечує 16-ти ступеневе регулювання. Таким чином, отримано 4 ступені регулювання (відповідають кутку відкриття тиристора $VS2$) від -25 кВАр до 0 кВАр при відсутності КУ; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї КУ ($C1$); від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох КУ ($C1, C2$); від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок ($C1, C2$ і $C3$).

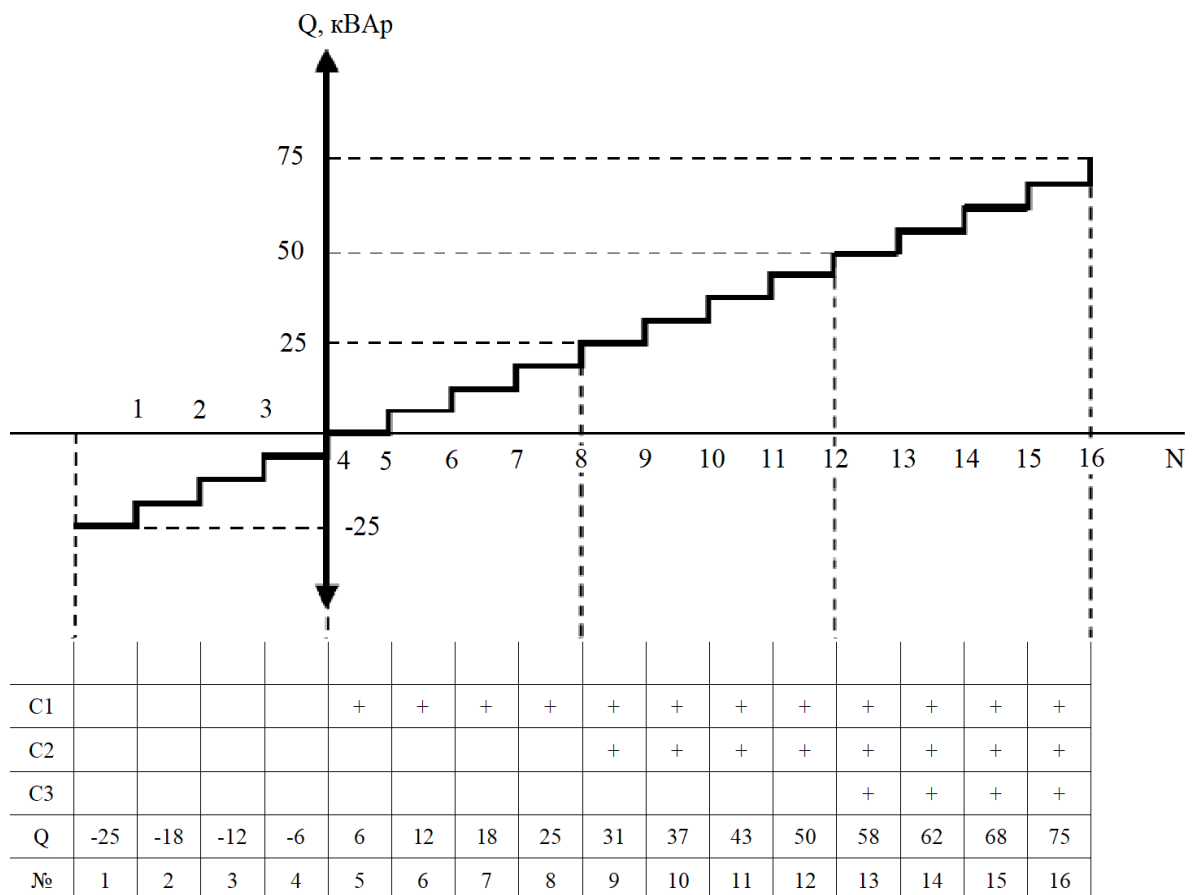


Рисунок 3.13 – Залежність значень потужності джерела реактивної потужності від числа ступенів регулювання

Запропоновано застосувати модель цифрової системи керування з використанням програмного комплексу NI Multisim 10, що забезпечує автоматичне регулювання реактивної потужності. Обрано варіант схеми з високою надійністю цифрових пристроїв, не вимагає додаткового налагодження [38].

Висновки до розділу 3

В якості основного джерела реактивної потужності цеху, яке забезпечує споживачів реактивною потужністю, понад ту кількість, яку можливо та економічно доцільно отримати від енергосистеми, застосовуються конденсаторні установки. Вони встановлюються як в мережах з напругою 6-10 кВ та 380 В

З метою отримання економічно доцільного режиму роботи електричної мережі цеху, що має змінний графік реактивного навантаження, доцільно використовувати автоматичне регулювання реактивної потужності (РП) компенсаційної установки.

Введення автоматичних джерел РП в цеху призведе до зниження втрат в період максимального навантаження в середньому до 0,081 кВт/кВАр.

Встановлено, що підключення батарей конденсаторів до шин навантаження призводить як до зменшення втрат електроенергії, так і до погіршення стійкості системи. Після ввімкнення БК, відбувається деформування характеристики $Q = f(U)$. Вона стає більш пологою – запас стійкості системи зменшується, тому що у складі навантаження з'являється від'ємний складник. З цього випливає, що при компенсації РП, необхідно передбачати регульовані джерела РП для коригування характеристики $Q = f(U)$. У системі необхідно підтримувати задані співвідношення між активною і реактивною потужністю – $\text{tg } \varphi$.

Для усунення недоліків схем компенсації, що були розглянуті, в роботі пропонується їх комбінування із використанням якомога більшої кількості переваг кожної із них. До застосування пропонується розроблена за цим принципом схема регульованого джерела реактивної потужності (РДРП). Схема забезпечує високу швидкість та відповідно високу ефективність

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання реактивної потужності, низький вміст вищих гармонік струму, що є її суттєвою перевагою. За такою схемою пропонується здійснювати компенсацію РП безпосередньо в мережах низької напруги цеху графітації.

Система керування регульованого джерела дозволяє змінити кут відкриття тиристора щодо анодної напруги (від моменту природної комутації) в регулюючій схемі, що дозволяє плавно регулювати реактивну потужність при змінному навантаженні в електричній мережі цеху.

Запропонована цифрова система керування реактивною потужністю забезпечує 16-ти ступеневе регулювання. Таким чином, отримано 4 ступені регулювання (відповідають кутку відкриття тиристора) від -25 кВАр до 0 кВАр при відсутності КУ; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї КУ; від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох КУ; від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок.

Запропоновано застосувати модель цифрової системи керування з використанням програмного комплексу NI Multisim 10, що забезпечує автоматичне регулювання реактивної потужності. Обрано варіант схеми з високою надійністю цифрових пристроїв, не вимагає додаткового налагодження.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Розрахунок економічної ефективності від використання нерегульованого пристрою компенсації реактивної потужності

Для розрахунків застосовуємо вихідні данні:

– споживання активної енергії обладнанням цеху графітації №4 (за показами лічильника активної енергії) – 14121677 кВт;

– споживання реактивної енергії обладнанням цеху графітації №4 (за показами лічильника реактивної енергії) – 12427076 кВАр.

Період споживання становить 720 годин – один місяць.

Середня активна потужність в мережі цеху визначається за виразом [25, 26]:

$$P_1 = \frac{E_p}{T}, \quad (4.1)$$

де E_p – обсяг спожитої активної енергії, кВт год;

T – період часу, години.

Середня реактивна потужність в мережі цеху визначається за виразом:

$$Q_1 = \frac{E_q}{T}, \quad (4.2)$$

де E_q – обсяг спожитої реактивної енергії, кВАр год.

$$P_1 = \frac{14121677}{720} = 19613,4 \text{ кВт};$$

$$Q_1 = \frac{12427076}{720} = 17259,8 \text{ кВАр}.$$

Середній коефіцієнт потужності в мережі цеху без системи плавного регулювання коефіцієнта потужності визначається за виразом:

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q_1}{P_1}\right)^2 + 1}}, \quad (4.3)$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{17259,8}{19613,4}\right)^2 + 1}} = 0,75.$$

Вартість спожитої електрообладнанням цеху графітації реактивної енергії обчислюється за виразом:

$$B = Q_1 \cdot k_{\text{тар.}} \cdot t_{\text{тар.}} \cdot w, \quad (4.4)$$

де k – тарифний коефіцієнт на оплату реактивної потужності;

t – час споживання електроенергії;

w – тариф на електроенергію (станом на 2021 рік), $w = 1,7$ грн/кВт·год.

Так як, на підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» діє 3-х зонний облік електричної енергії, для обчислення оплати реактивної потужності за тарифними зонами у таблиці 4.1 представлено коефіцієнти тарифних зон та їх межі протягом доби у годинах.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти 3-х зонного обліку електроенергії

Тарифна зона	Коефіцієнт	Межі тарифних зон
Нічна	0,25	з 23:00 до 6:00
Денна	1,02	з 6:00 до 8:00 з 10:00 до 18:00 з 22:00 до 23:00
Максимум (пік)	1,8	з 8:00 до 10:00 з 18:00 до 22:00

Обчислення вартості реактивної потужності за тарифними зонами:

$$B_{\text{ніч}} = Q_1 \cdot k_{\text{тар.}} \cdot T_{\text{тар.}} \cdot w. \quad (4.5)$$

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_{1\text{міч}} = 17259,8 \cdot 0,25 \cdot 7 \cdot 1,7 = 51347,9 \text{ грн,}$$

$$B_{1\text{день}} = 17259,8 \cdot 1,02 \cdot 11 \cdot 1,7 = 329213,4 \text{ грн,}$$

$$B_{1\text{мак}} = 17259,8 \cdot 1,8 \cdot 6 \cdot 1,7 = 316889,9 \text{ грн.}$$

Вартість реактивної енергії за добу обчислюється за виразом:

$$B_{1\text{доб.}} = B_{1\text{міч}} + B_{1\text{день}} + B_{1\text{мак}}, \quad (4.6)$$

$$B_{1\text{доб.}} = 51347,9 + 329213,4 + 316889,9 = 697451,2 \text{ грн.}$$

Вартість реактивної потужності за рік обчислюється за виразом:

$$B_{1\text{рік}} = B_{1\text{доб.}} \cdot n, \quad (4.7)$$

де n – кількість днів у році.

$$B_{1\text{рік}} = 697451,2 \cdot 365 = 254569688,0 \text{ грн.}$$

Повну середню потужність, що споживається обладнанням цеху графітації обчислюємо за виразом:

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi}, \quad (4.8)$$

або

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4.9)$$

$$S_1 = \frac{19613,4}{0,75} = 26151,2 \text{ кВт.}$$

4.2 Розрахунок економічної ефективності від використання регульованого джерела реактивної потужності

Застосування регульованого джерела реактивної потужності (РДРП) дозволяє підтримувати $\cos \varphi$ в електричній мережі цеху графітації на рівні 0,95.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В подальших розрахунках замінюємо коефіцієнт потужності, що був до удосконалення системи компенсації РП ($\cos \varphi_1 = 0,75$) на той, що буде після встановлення пристрою компенсації із РДРП ($\cos \varphi_2 = 0,95$).

Виходячи з того, що активна потужність цеху залишається незмінною ($P_1 = P_2 = 19613,4$ кВт), то реактивна потужність при новому коефіцієнті потужності ($\cos \varphi_2 = 0,95$) після встановлення автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності визначаємо за виразом:

$$Q_2 = P_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2. \quad (4.10)$$

Враховуючи те, що тригонометричні функції пов'язані між собою через співвідношення в прямокутному трикутнику, одиничне коло і тригонометричні тотожності, тоді для $\cos \varphi_2 = 0,95$ отримаємо $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,3$.

$$Q_2 = 19613,4 \cdot 0,3 = 9806,7 \text{ кВАр.}$$

Прогнозована вартість реактивної енергії за тарифними зонами після удосконалення системи компенсації РП знаходиться аналогічно як і в попередньому випадку за виразом (4.4):

$$B_{2\text{ніч}} = 9806,7 \cdot 0,25 \cdot 7 \cdot 1,7 = 29174,9 \text{ грн,}$$

$$B_{2\text{день}} = 9806,7 \cdot 1,02 \cdot 11 \cdot 1,7 = 187053,0 \text{ грн}$$

$$B_{2\text{макс}} = 9806,7 \cdot 1,8 \cdot 6 \cdot 1,7 = 180051,0 \text{ грн.}$$

Вартість реактивної енергії за добу обчислюється за виразом (4.6).

$$B_{2\text{доб}} = 29174,9 + 187053,0 + 180051,0 = 396278,0 \text{ грн.}$$

Вартість реактивної потужності за рік обчислюється за виразом (4.7).

$$B_{2\text{рік}} = 396278,0 \cdot 365 = 144641470,0 \text{ грн.}$$

Розрахунок економії витрат підприємства за рік на перетоки реактивної електроенергії за рахунок удосконалення системи компенсації РП:

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta E = (B_{1\text{рік}} - B_{2\text{рік}}). \quad (4.11)$$

$$\Delta E = (254569688,0 - 144641470,0) = 109928218 \text{ грн.}$$

Термін окупності встановлення регульованого пристрою компенсації визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{B_{ку}}{B_{1\text{рік}} - B_{2\text{рік}}}, \quad (4.11)$$

де $B_{ку}$ – вартість регульованого пристрою компенсації, $B_{ку} = 1\,8700\,000$ грн.

$$T_{ок} = \frac{18900000}{254569688,0 - 144641470,0} = 0,35 \text{ роки.}$$

Термін окупності встановлення регульованого пристрою компенсації, склав 4 місяці.

Висновки до розділу 4

Результати проведених розрахунків свідчать про економічну доцільність удосконалення системи електропостачання шляхом встановлення автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності, адже термін окупності додаткових капітальних вкладень на модернізацію становить 4 місяці.

Річний економічний ефект від застосування системи компенсації реактивної потужності в цеху графітації із впровадженням регульованого джерела реактивної потужності становить 110 млн. грн.

Такого економічного ефекту можливо досягти лише при повному завантаженні печей графітації цеху протягом доби, місяця та року. Відповідно, при меншому завантаженні печей графітації економічний ефект зменшиться, а термін окупності збільшиться.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено теоретичні дослідження процесів компенсації реактивної потужності для електричної мережі промислового підприємства та запропоновано шляхи вирішення науково-технічної проблеми щодо удосконалення системи компенсації реактивної потужності. На основі отриманих в роботі результатів можна зробити наступні висновки.

1. Аналіз споживання енергетичних ресурсів цехами підприємства ПрАТ «Укрграфіт» показав, що найбільшим є рівень споживання електричної енергії. У 2021 році цехами підприємства сумарно спожито 245,2 ГВт год електричної енергії, що становить більше 50 % від загального обсягу спожитих за цей період усіх видів енергетичних ресурсів.

2. В результаті дослідження споживання електричної енергії технологічним обладнанням виробничих цехів підприємства встановлено, що найбільший рівень споживання електроенергії припадає на цех графітації №4 – 175,5 ГВт год, що становить близько 73% від загального електроспоживання підприємства. Основна частина електричної енергії в цеху №4 споживається обладнанням печей графітації – 169,5 ГВт год.

3. Перспективним напрямком досліджень є пошук шляхів удосконалення елементів системи електропостачання цеху графітації з метою суттєвого зменшення обсягів споживання електричної енергії, зниження енергоемності виробництва та підвищення енергоефективності підприємства в цілому.

4. Баланс реактивної потужності визначає рівень напруги у вузлах електричної мережі підприємства. До засобів регулювання напруги в електричних мережах слід віднести: трансформатори з РПН, регулювання напруги за допомогою батарей конденсаторів і статичних тиристорних компенсаторів.

5. При регулюванні потоків реактивної потужності за рахунок роботи пристроїв компенсації можна не тільки змінювати рівень напруги в електричній мережі, а й знижувати втрати активної потужності і відповідно втрати електричної енергії в елементах мережі (лініях і трансформаторах).

6. На підприємстві процес графітації проводиться в спеціальних печах електричного опору прямого нагріву, які під час роботи мають високий

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індуктивний опір i , відповідно, споживають значні обсяги реактивної потужності, що веде до суттєвого зниження $\cos \phi$ в мережі підприємства.

Для поліпшення якості графітації та якості електроенергії до шинопакету печі підключена конденсаторна установка із ступінчастим регулюванням ємності. На початку компанії графітації $\cos \phi$ дорівнює 0,94...0,96 та поступово зменшується протягом всієї компанії. В кінці компанії $\cos \phi$ складає 0,5...0,74. При ручному регулюванні потужності компенсації черговим персоналом ефективність компенсації дуже низька.

7. З метою отримання економічно доцільного режиму роботи електричної мережі цеху, що має змінний графік реактивного навантаження, доцільно використовувати автоматичне регулювання реактивної потужності компенсаційної установки. Введення автоматичного джерела реактивної потужності дозволить знизити втрати в період максимального навантаження в середньому до 0,081 кВт/кВАр.

8. Встановлено, що підключення батарей конденсаторів до шин навантаження призводить як до зменшення втрат електроенергії, так і до погіршення стійкості системи. Після ввімкнення БК, відбувається деформування характеристики $Q = f(U)$. Вона стає більш пологою – запас стійкості системи зменшується. При компенсації, необхідно передбачати регульовані джерела для коригування характеристики $Q = f(U)$. У системі необхідно підтримувати задані співвідношення між активною і реактивною потужністю – $\tan \phi$.

9. В роботі до застосування безпосередньо в мережах низької напруги цеху графітації пропонується схема регульованого джерела реактивної потужності. Схема забезпечує високу швидкість та високу ефективність регулювання реактивної потужності, низький вміст вищих гармонік струму, що є її суттєвою перевагою.

10. Система керування регульованого джерела дозволяє змінити кут відкриття тиристора щодо анодної напруги (від моменту природної комутації) в регулюючій схемі, що дозволяє плавно регулювати реактивну потужність при змінному навантаженні в електричній мережі цеху.

11. Цифрова система керування реактивною потужністю забезпечує 16-ти ступеневе регулювання. Таким чином, отримано 4 ступені регулювання (відповідають кутку відкриття тиристора) від -25 кВАр до 0 кВАр при

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

відсутності КУ; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї КУ; від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох КУ; від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок.

12. Річний економічний ефект від реконструкції системи компенсації реактивної потужності в цеху графітації шляхом впровадженням регульованого джерела реактивної потужності становить 110 млн. грн. Термін окупності додаткових капітальних вкладень на модернізацію становить 4 місяці.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коваленко О. І., Коваленко Л.Р. Основи електропостачання : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2025. 238 с. ISBN 978-617-8559-20-5. <https://elar.tsatu.edu.ua/items/5aeb5d83-d3d7-4cfb-9bb4-1e2f6e23c445/>
2. Структура виробництва електроенергії в Україні на початок 2022 року. Українська енергетична біржа : вебсайт. URL : <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-vitchiznyanogvirobnitstva-elektroenergii/> (дата звернення : 05.01. 2026).
3. Споживання електроенергії в Україні у 2021 році. Всеукраїнська енергетична асамблея : вебсайт. URL : <https://uaea.com.ua/news/pek-news/ee-consumption-12.html> (дата звернення : 05.01. 2026).
4. Коваленко О. І., Коваленко Л. Р. Шляхи підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 19-29. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-2>
5. Коваленко Л. Р., Коваленко О.І. Підвищення пропускної спроможності електричних мереж шляхом впровадження засобів компенсації реактивної потужності. *Розвиток сучасної науки та освіти : реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали VI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 28-30 травня 2025 р. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. С. 62-68.
6. Український графіт. Про компанію. URL : <http://https://ukrgrafit.com.ua/> . (дата звернення : 06.01. 2026).
7. Український графіт. Проекти та технології. URL : <https://ukrgrafit.com.ua/projects/replacement-of-graphitization-furnaces/>(дата звернення : 06.01. 2026).
8. Коваленко О. І., Коваленко Л. Р., Мунтян В. О., Радько І. П. Основи електропостачання сільського господарства : Навчальний посібник Мелітополь :ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011. 462 с.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Бурбело М. Й., Мельничук Л. М. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : Монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 110 с.

10. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text> (дата звернення 12.01.2026).

11. Тарифи на Запоріжжяобленерго. URL : <https://www.zoe.com.ua>. (дата звернення : 08.01.2026).

12. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18#Text> (дата звернення 12.01.2026).

13. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності [Чинний від 20.05.2014]. Видання офіційне. Київ : Національний стандарт України, 2014. 27 с.

14. Енергозберігаючі технології в електропостачанні : конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, І. І. Борзенков, І. М. Дяго вченко, Т. М. Загородня. Суми : Сумський державний університет, 2023. 99 с.

15. Ягуп В., Ягуп К., Ковальова Ю., Харченко В., Бесараб Т., Краснов О., Доманський І., Доманський В., Костін Г., та АбуГух Х.Г. (2019). Аналіз та оптимізація режимів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 3 (8 (99)), 13-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168584>.

16. Коваленко О.І., Фесенко О.В. Дослідження якості електричної енергії в локальній мережі з вітроенергетичними установками. *Міжнародна міжгалузева конференція «Стратегія розвитку агровольтаїки: стан виклики та кроки впровадження в Україні»*. 8 квітня 2025 року м. Київ. Київ, 2025. С. 277-283. <https://agrivoltaic.org.ua/konf-2025-agriua/>

17. Козирський В. В., Волошин С. М. Основи електропостачання : підручник. Київ : Компринт, 2021. 497с.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Говоров П. П., Говоров В. П. Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання та освітлення міст. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2013. № 1(14). С. 71-76.

19. Лежнюк П. Д., Грицюк Ю. В., Пірняк В. М. Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Енергетика та електротехніка*. 2012. № 2. С. 1-6.

20. M.T.L. Gayatri, Alivelu.M. Parimi, A.V. Pavan Kumar. (2018). A review of reactive power compensation techniques in microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1030-1036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.006>.

21. O. Igbinoia, Ghaeth Fandi, Jan Švec, Zdenek Müller, Josef Tlustý Famous. Comparative Review of Reactive Power Compensation Technologies. *2015 16-th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. doi: 10.1109/EPE.2015.7161066.

22. Пристрій компенсації реактивної потужності в мережі живлення змінного струму: пат. 159344 Україна: МПК H02J 3/18. № u 2024 04840; заявл. 10.10.2024; опубл. 14.05.2025 Бюл. № 20. 3 с.

23. Яримбаш Д. С. Аналіз електромагнітних та термоелектричних процесів в печах Ачесона. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, Харків, 2014. №6 С. 11 -21.

24. Яримбаш Д. С. Дослідження електромагнітних та термоелектричних процесів у печах графітації змінного та постійного струму. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро, 2015. №3.

25. Ткаченко Н. М., Кулініченко В. Р. Економіка підприємств енергетичного комплексу : підручник. Київ : Алерта, 2017. 336 с

26. Проскурня О.М., Ганус О.І. Економіка в енергетиці : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2012. 272 с.

					21ЕЕД. 11960498.02.26.000000ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		