

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електротехніки та енергоефективності

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення енергоефективності ПрАТ «Укрграфіт»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1410

Яковенко В.С.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2021 рік

Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра

(повне найменування вищого навчального закладу)

електротехніки та енергоефективності

(по

овна назва кафедри)

Рівень вищої освіти

другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика,
електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В.Л. Коваленко

“ 14 ” 12 2021 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Яковенку Віталію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Підвищення енергоефективності ПрАТ «Укрграфіт»

керівник магістерської роботи

Артемчук В.В., професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «30» 06 2021 року № 974-с

2. Строк подання студентом магістерської роботи 01 грудня 2021 року

3. Вихідні дані роботи Напруга живлення – Показники лічильників активної та реактивної; потужності – 4578431 кВт, 3765453 квар; середній тариф на електричну енергію – 1,7 грн/кВт·год.; період знаття показників лічильників – 720 годин.

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

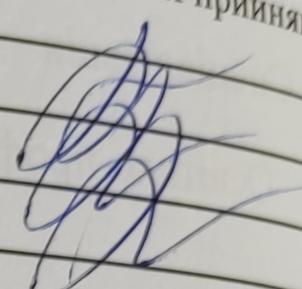
Вступ. 1) Загальні відомості про ПрАТ «Укрграфіт». 2) Аналіз систем електропостачання промислових підприємств. 3) Дослідження шляхів підвищення ефективності споживання електричної енергії цехом №9.

5. Перелік графічного матеріалу (пропонується): 1) Аналіз можливості підвищення ефективності споживання електричної енергії цехом №9 ПрАТ «Укрграфіт». 2) Аналіз енергоспоживання підприємства ПрАТ «Укрграфіт». електроприводів для керування вентиляторами; 3) Витрати підприємства на електроенергію споживану печами. 4) Конструкція печі графітації. 5) Коротка електрична мережа печі графітації. 6) Електропостачання півної секції №5 цеху №9. 7) Аналіз пристроїв компенсації

реактивної потужності. 8) Переваги встановлення регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності. 9) Цифрова система управління регульованим пристроєм компенсації реактивної потужності.

Висновки

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор	
Розділ 2	Артемчук В.В., професор	
Розділ 3	Артемчук В.В., професор	

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Загальні відомості про ПрАТ «Укрграфіт».	10.10.2021	
2	Аналіз систем електропостачання промислових підприємств.	20.11.2021	
3	Дослідження шляхів підвищення ефективності споживання електричної енергії цехом №9.	01.12.2021	

Студент _____

(підпис)

В.С. Яковенко
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____

(підпис)

В.В. Артемчук
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Яковенко В.С. Підвищення енергоефективності ПрАТ «Укрграфіт».

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник В.В. Артемчук. Інженерний навчально науковий інститут ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів, 2021.

Виконано аналіз способів і засобів компенсації реактивної потужності. Проаналізовано ефективність компенсації реактивної потужності печей графітації. Запропоновано модель системи управління вентилями перетворювачами для регулювання реактивної потужності. Обрано оптимальний регулюючий пристрій компенсації реактивної потужності печей графітації.

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ПЕЧЕЙ ГРАФІТАЦІЇ, РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ, ЦИФРОВА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ

ABSTRACT

Yakovenko V.S. Improving energy efficiency of PJSC "Ukrgrafit".

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, supervisor V.V. Artemchuk. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny ZNU, Department of Information Economics, Entrepreneurship and Finance, 2021.

The analysis of methods and means of reactive power compensation is performed. The efficiency of reactive power compensation of graphitization furnaces is analyzed. A model of valve converter control system for reactive power control is proposed. The optimal regulating device for compensation of reactive power of graphite furnaces is chosen.

Keywords: ELECTRICAL NETWORKS OF GRAPHIC FURNACES, REGULATION OF REACTIVE POWER, DEVICES OF COMPENSATION, DIGITAL CONTROL SYSTEM

АННОТАЦИЯ

Яковенко В.С. Повышение энергоэффективности ЧАО «Укрграфит».

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра за специальностью 141 – Электроэнергетика, электротехника и электромеханика, научный руководитель В.В. Артемчук. Инженерный учебно-научный институт им. Ю.М. Потебни ЗНУ, кафедра информационной экономики, предпринимательства и финансов, 2021.

Выполнен анализ способов и средств компенсации реактивной мощности. Проанализирована эффективность компенсации реактивной мощности печей графитации. Предложена модель системы управления вентильными преобразователями для регулирования реактивной мощности. Выбрано оптимальное регулирующее устройство компенсации реактивной мощности печей графитации.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ, РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

ЗМІСТ

Вступ	7
1. Загальні відомості про ПрАТ «Укрграфіт»	9
1.1 Характеристика заводу	9
1.2 Структурні підрозділи підприємства	13
1.3 Технологічний процес виробництва на підприємстві	15
1.4 Аналіз енергоспоживання підприємства	20
2. Аналіз енергоспоживання підприємства	27
2.1 Аналіз факторів, що впливають на якість електроенергії промислових підприємств	27
2.2 Рівні напруги в системах електропостачання промислових підприємств	32
2.3 Аналіз системи електропостачання печей графітації	45
3 Дослідження шляхів підвищення ефективності споживання електричної енергії цехом №9	58
3.1 Джерела реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств	58
3.2 Аналіз схем пристроїв компенсації реактивної потужності	68
3.3 Система управління вентилями перетворювачами в схемі регульованого джерела реактивної потужності	74
3.4 Компенсація реактивної потужності печей графітації	80
Висновки.	84
Перелік посилань	85
Додаток А	89

ВСТУП

Одними з основних питань, що вирішуються при проектуванні і експлуатації систем електропостачання промислових підприємств, є питання компенсації реактивної потужності: вибір типу, потужності, місця установки і режиму роботи компенсуючого пристрою (КП).

Компенсація реактивної потужності дозволяє:

- забезпечувати баланс реактивної потужності в електричній мережі підприємства;

- знижувати втрати потужності та електроенергії в системі електропостачання;

- поліпшувати показники якості електроенергії в системі електропостачання промислового підприємства.

Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання мереж є досить ефективним заходом, який поліпшує показники якості напруги, знижує витрату електроенергії на її транспорт, знижує потоки реактивної потужності і знижує витрати на обладнання (менше перетину проводів, менше встановлена потужність трансформаторів).

Актуальність теми. Питання компенсації реактивної потужності актуальні для електричних мереж різної напруги, як в Україні, так і в інших країнах. Ці питання є актуальними і для систем електропостачання промислових підприємств, де в зв'язку зі застарілим устаткуванням йде інтенсивне вдосконалення і будівництво нових промислових підприємств з застосуванням сучасних ефективних технологій і нового електрообладнання. Системи електропостачання промислових підприємств повинні задовольняти сучасним вимогам до якості електричної енергії.

В даний час в системах електропостачання промислових підприємств

застосовують тільки компенсуючі пристрої у вигляді нерегульованих конденсаторних батарей. Ці пристрої не дозволяють отримати максимальний ефект від компенсації реактивної потужності, тому необхідно застосувати регульоване джерело реактивної потужності.

Таким чином, досить актуальною є задача заміни застарілого нерегульованого джерела реактивної потужності на нове та сучасне регульоване джерело реактивної потужності.

Мета магістерської роботи – оптимізація процесу компенсації реактивної потужності печей графітації.

Для досягнення вказаної мети поставлені такі основні завдання:

–проаналізувати ефективність компенсації реактивної потужності печей графітації;

–провести аналіз існуючих способів і засобів компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств;

–провести порівняльну оцінку джерел реактивної потужності з різними системами управління, які застосовуються в системах електропостачання промислових підприємств;

–обрати схему регульованого джерела реактивної потужності для системи електропостачання печей графітації;

–обрати цифрову систему управління схеми регульованого джерела реактивної потужності;

–розрахувати економічну ефективність встановлення регульованого пристрою компенсації реактивної потужності.

Об'єкт дослідження – електричні мережі печей графітації.

Предмет дослідження – регулювання реактивної потужності в електричних мережах печей графітації.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРАТ «УКРГРАФІТ»

1.1 Характеристика заводу

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. Укрграфіт був першим електродним заводом в Радянському Союзі і називався за тих часів «Дніпровський електродний завод».

21 вересня 1933 року – день виробництва першої промислової партії вуглецевої продукції, випалених анодів для алюмінієвих електролізерів, саме цей день вважають днем народження Дніпровського електродного заводу. Спочатку підприємство входило до складу алюмінієвого комбінату, що є частиною Запорізького промислового комплексу.

У 1940 році завод було виділено у самостійну промислову структуру, у цей період побудовано цех графітації, що видав першу 1000 тон заготовок для електродів. Але з початком воєнних дій у Запоріжжі в 1941 році завод був демонтований і евакуйований до Уралу. Понесені збитки були колосальні, терміни відновлення жорсткі, і вже в травні 1945 року було знову організоване виробництво анодних й електродних мас. У 1948 році завод було цілком відновлено і він почав працювати за повним технологічним циклом.

В наступні роки завод стрімко розвивався та розширювався, були спроектовані і побудовані нові цехи, вводилося й освоювалося сучасне устаткування, розроблялися і впроваджувалися нові технологічні процеси.

У 1994 році Дніпровський електродний завод був перетворений у Приватне акціонерне товариство «Укрграфіт». За останні роки, завдяки самовідданій праці колективу, підприємство змогло збільшити обсяги

виробництва і рентабельність продукції, провести технічне переозброєння, поліпшити економічні показники діяльності, значно розширити асортимент і забезпечити конкурентоздатність своєї продукції [1].

Підприємство завжди одним з перших здійснювало розробку і впроваджувало у виробництво нові види технологій, сучасні агрегати і технологічні лінії. Багато зроблено за останні роки. У 1997 році здійснене введення в промислову експлуатацію нового цеху вугільних заготовок, що немає аналогів у країнах Східної Європи і Росії.

Застосування електричних кальцинаторів для глибокої термічної обробки сировини дозволило створити єдине в СНД виробництво електрокальцинованих антрацитів, що значно поліпшило експлуатаційні властивості виробленої вуглецевої продукції – катодних блоків для футерування алюмінієвих електролізерів і блоків для футерування поду і горна доменних печей. Освоєно виробництво матеріалів на основі електрокальцинованого антрациту з використанням до 70% графіту.

У 2000-2001 роках упроваджена технологія й освоєно в промислових масштабах виробництво графітованих блоків для виготовлення анодів магнієвих електролізерів, що відрізняються зниженим питомим електричним опором і підвищеною експлуатаційною стійкістю. У 2001 році було побудовано цех і освоєно виробництво анодів для магнієвої промисловості з просоченнями неорганічними компаундами на основі фосфорних сполук, що не має аналогів на електродних заводах країн СНД.

У 2003-2004 роках освоєне виробництво маси холодної набивки, вуглецевої теплопровідної маси для доменних печей і маси холодної подової набивки для алюмінієвих електролізерів. Проведено велику роботу з удосконалення технології і модернізації виробництва продукції, що серійно виробляється. У цей час підприємство має у своєму розпорядженні перспективні розробки як в області удосконалювання продукції, що серійно виробляється, так і в галузі створення нових видів продукції [1].

Особливу роль у розвитку підприємства зіграли розробка і впровадження системи керування якістю, що дозволила розвинути й удосконалити технологію, виробництво і систему керування підприємства в цілому, дозволила підняти конкурентоздатність продукції на більш високий якісний рівень. Сьогодні на підприємстві впроваджені міжнародні стандарти ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001. У сфері удосконалювання системи керування ПрАТ «Укрграфіт» має намір йти далі і впроваджувати концепцію керування якістю (TQM) із ще більш високим рівнем вимог до всіх аспектів функціонування підприємства.

На ПрАТ «Укрграфіт» постійно удосконалюються технологічні і виробничі процеси, ведеться робота з модернізації і розробки нових видів продукції. Величезна увага приділяється якості продукції, що виробляється.

Сьогодні продукція ПрАТ «Укрграфіт» широко використовується на металургійних підприємствах України, СНД, країнах ближнього і далекого зарубіжжя. Катодні блоки ПрАТ «Укрграфіт» визнані кращими на всіх підприємствах алюмінієвої промисловості СНД і складають серйозну конкуренцію на світовому ринку лідерам у виробництві цього виду продукції. Графітовані електроди виробництва ПрАТ «Укрграфіт» широко відомі в СНДі конкурентоздатні на світовому ринку.

ПрАТ «Укрграфіт» є єдиним постачальником у СНД графітованих блоків і анодів із просоченням неорганічними компаундами для магнієвої промисловості і у цей час виходить з цією продукцією на світовий ринок [1].

Завдяки вигідному географічному положенню, підприємство має можливість відвантаження експортної продукції залізничним, автомобільним, річковим і морським транспортом.

На підприємстві використовуються сучасні й ефективні види упакувань, що забезпечують товарний вид продукції і її збереження при транспортуванні усіма видами транспорту.

Продукція підприємства в 1999 році була відзначена почесним знаком

«Вища проба», за підсумками всеукраїнського рейтингу 2000 року ПрАТ«Укрграфіт» увійшло до числа «Сто кращих компаній України, які динамічно розвиваються». Продукція визнана переможцем і лауреатом всеукраїнського конкурсу якості «100 кращих товарів України 2003».

У 2004 році ПрАТ «Укрграфіт» було відзначено міжнародною нагородою «Європейська якість».

ПрАТ «Укрграфіт» пропонує різноманітний асортимент продукції з різними властивостями матеріалів і конфігурацією виробів. Підприємство постійно працює над удосконалюванням технології і виробництва з метою забезпечення високих експлуатаційних характеристик продукції у споживачів.

Продукція, що виготовляється на підприємстві це:

- Електроди графітовані і ніпелі;
- Блоки графітовані;
- Аноди і бруси графітовані;
- Блоки вуглецеві;
- Маса вуглецева: тверда, пастоподібна, холоднонабивна;
- Блоки подові;
- Блоки бокові;
- Маса холоднонабивна подова
- Маса анодна;
- Маса електродна.

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 країнахСНД, успішно конкуруючи на світовому ринку [1].

1.2 Структурні підрозділи підприємства

Основною структурною одиницею великого підприємства прийнято вважати цех – відокремлений в адміністративному відношенні підрозділ, де виконуються основні, допоміжні або обслуговуючі виробничі процеси [3].

Основними цехами вважаються ті, в яких безпосередньо виконуються які-небудь стадії технологічного процесу по перетворенню вихідної сировини і матеріалів в готову продукцію, на якій спеціалізується дане підприємство.

До допоміжних відносяться цехи, що забезпечують нормальне функціонування процесу виробництва (інструментальний, ремонтний, модельний, енергетичний, паросилова та ін.).

Обслуговуючі цехи зайняті наданням різноманітних послуг виробництву (транспортне, складське господарство, санітарно-технічні пристрої, телефонний зв'язок, центральні заводські лабораторії).

Побічні цехи займаються переробкою відходів і побічних продуктів основного виробництва, а в підсобних цехах здійснюється діяльність, не пов'язана з виробничим профілем підприємства (виробництво тари, цегли, сільськогосподарської продукції)[4].

На території заводу розташовано 5 основних цехів, які безпосередньо виробляють випуск готової продукції.

Цех вугільних заготовок №1 здійснює виготовлення заготовок для всього асортименту графітованих електродів і графітованих анодів на основі малозернистих нафтових коксів, а також вуглецевої анодної маси, яка застосовується при виготовленні алюмінію. Він є первинною ланкою у процесі виробництва електродної продукції. Оснащений сорокаметровими загартовувальними обертовими печами барабанного типу, опалювальними природним газом для термічної обробки коксів і гідравлічними пресами, одинадцятьма змішувальними машинами ємністю 2000 літрів.

Змішувально-пресовий цех №2 – спеціалізований на випуску заготовок різних футерованих виробів на основі термічно обробленого

антрациту для алюмінієвих електролізерів, доменних та інших руднотермічних печей при виробництві феросплавів, нікель фтору та іншого, а так товарної вуглецевої маси для самообпікаючих електродів. В цеху є технологічні лінії: підготовки сировини (ТЛ №1), виробництва пресованих подових блоків для різних руднотермічних печей (ТЛ №2, ТЛ №3), виробництва пресованих заготовок бічної футеровки алюмінієвих електролізерів (ТЛ №4) і різних блоків з максимальним розміром 400x500 мм (ТЛ №5), виробництва електродної вуглецевої маси для самообпікаючих електродів (ТЛ №6). Дільниця пресів цеху оснащена двома потужними гідравлічними прошивними пресамизусиллям 63 та 35 МН. Всі технологічні лінії працюють в автоматизованому режимі. Дозування сухої шихти і пеку проводиться в автоматичному режимі звикористанням точних дозаторів.

Цех випалу №3 здійснює технічний переділ, призначений для випалу та просочення всіх видів вуглеграфітових заготовок, як на основі нафтових коксів, так і на основі термоантрациту. Цех оснащений багатокамерними кільцевими печами безперервної дії, які працюють на природному газі з тривалістю технологічного циклу 325-400 годин.

Цех графітації №4 здійснює переділ графітації заготовок електродів і анодів на основі нафтових коксів. Цех оснащений електричними печами опору, що працює на змінному та постійному струмі.

Цех механічної обробки електродів №5 проводить механічну обробку електродних та інших вуглецевих заготовок, а також самостійну упаковку готових виробів. Цех оснащений напівавтоматичними лініями і верстатами, що забезпечують необхідну точність обробки заготовок і нарізки різних типів різьби.

До допоміжних цехів відносяться: доменний 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 та інші. Всі цеха мають свої адміністративно-побутові приміщення, які живляться від

силових трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій. Режим роботи заводу – три зміни, число часів при максимальному навантаженні – 4550 годин.

1.3 Технологічний процес виробництва на підприємстві

Як показує багаторічний досвід роботи заводів, в отриманні якісних виробів важливу роль відіграє контроль та дотримання технологічного режиму на кожному етапі виробництва.

Дуже важливо чітко організувати роздільний прийом і закрите зберігання сировинних матеріалів різних за властивостями. Це дозволить забезпечити точне дозування сировини на наступних стадіях виробництва, що є основою для отримання виробів стабільної якості.

Принципова технологічна схема електродного виробництва, яка показана на рисунку 1.1, складається з ряду основних операцій: прийом і підготовка сировинних матеріалів, приготування електродної маси, формування заготовок, випал, просочення, графітація та механічна обробка заготовок [5].

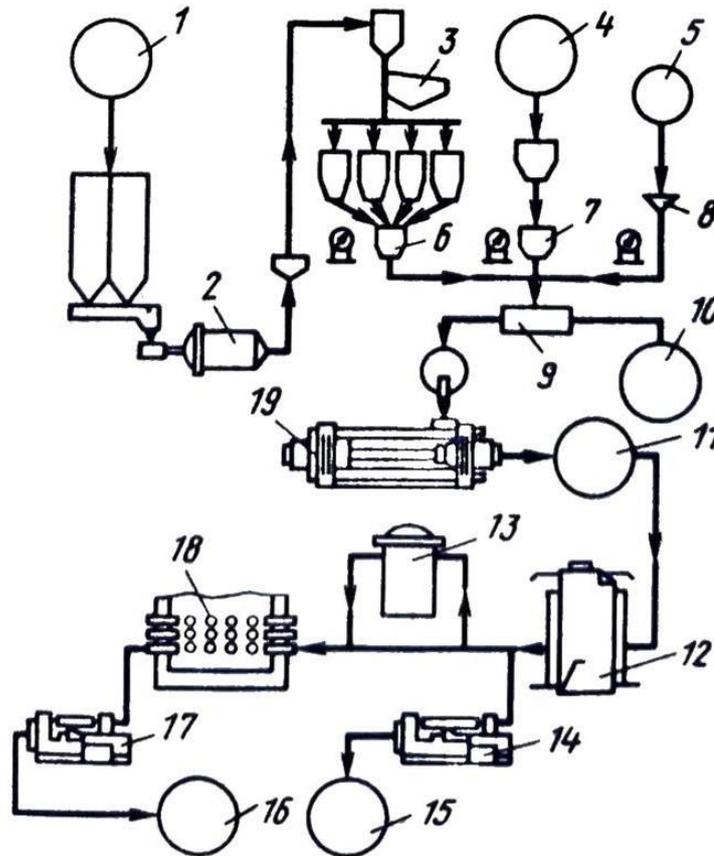
При підготовці сировини здійснюється ряд технологічних операцій: витримання пеку при температурі, сушка пропаленого вуглецевого наповнювача або його прожарювання, дроблення, розмелювання і розсівання на сортові фракції вуглецевого наповнювача.

Основне призначення витримання пеку при температурі, яка використовується на "зеленому" етапі переробки – це стабілізація його властивостей в даному температурному інтервалі.

Сушінню піддається поставлений на завод прожарений вуглецевий наповнювач, що містить більше 0,5% вологи [6].

Прожарювання або термічна обробка наповнювача при високій температурі – одна з вирішальних технологічних операцій. Основна мета прожарювання полягає в попередній підготовці структури і властивостей

наповнювача до подальшої термічної переробки. При прожарюванні з наповнювача видаляється волога і леткі речовини, зростає щільність, механічна міцність, електрична провідність, теплопровідність і термостійкість, змінюється структура речовини [5-9].



1 – склад сировини; 2 – дроблення, розмелювання; 3 – розсівання; 4 – склад пеку; 5 – склад добавок; 6 – дозування шихти; 7 – дозування пеку; 8 – дозування добавок; 9 – змішування; 10 – товарні маси; 11 – склад «зелених» заготовок; 12 – випал; 13 – просочення; 14 – механічна обробка вугільної продукції; 15 – склад вугільної продукції; 16 – склад графітованої продукції; 17 – механічна обробка графітованої продукції; 18 – графітація; 19 – пресування

Рисунок 1.1 – Технологічна схема електродного виробництва

Для отримання сортових фракцій вуглецевий наповнювач дроблять, розмелюють і класифікують. Зазвичай дробленням прийнято називати

процес зменшення розмірів крупного шматкового матеріалу. Основне завдання процесу розмелювання – отримати сортову фракцію 71 мкм.

Дозування сировинних матеріалів виконують двома способами: за масою або об'ємом. Дозування за об'ємом застосовують у виробництві вуглецевих мас на змішувачах безперервної дії. Спосіб об'ємного дозування найбільш простий в реалізації. Однак він не забезпечує високу точність дозування, оскільки маса дозованого матеріалу залежить від об'ємної щільності. У зв'язку зі зростанням вимог до якості електродної продукції, велике поширення одержав більш точний спосіб – вагове дозування компонентів шихти і сполучного матеріалу [6].

З сортових дозувальних бункерів певну кількість кожної фракції і сполучних (кам'яновугільний пек) подають в змішувач. Фізичні властивості одержуваного штучного графіту істотно залежать від складу суміші, тому кожен вид графітованої продукції має свій рецепт суміші [10-12]. Шихта в змішувачах перемішується протягом 1-5 годин.

Мета змішування – отримання маси у вигляді однорідної суміші, здатної добре сприймати пластичну деформацію. Температуру маси, яку перемішують, доводять до рівня 125-150 °С. У процесі перемішування маси в неї додають хімічно активні відновники, що сприяють вдосконаленню структури графіту [13].

Отримана вуглецева маса при необхідності охолоджується і надходить в пресове відділення, де їй надають необхідну форму. Пресування маси виробляють або формуванням в закритій матриці, або продавлюванням через мундштук певної форми. Вироби після пресування мають температуру близько 80°С і для запобігання деформування під дією власної ваги їх охолоджують до затвердіння в водяному середовищі [14, 15].

Від способу і характеристик пресування сильно залежать такі фізичні властивості графітованого матеріалу як щільність, електро- і теплопровідність, механічна міцність [16]. При пресуванні в заготовках виникає текстура, яка незникає навіть після високотемпературної обробки і

проявляється в тому, що вуглеграфітові вироби в залежності від напрямку по відношенню до осі пресування мають різні механічні та теплофізичні властивості [17]. Причини виникнення текстури криються в анізотричності зерна наповнювача і способі пресування [18].

Конструктивні фактори відображають тип і стан робочих органів основного технологічного устаткування – змішувачів, міксерів-охолоджувачів, пресів і пресового інструменту, спосіб прийому і передачі заготовок на охолоджувальній пристрій, пристрій і спосіб нарізання електродних заготовок, особливості конструкції і спосіб обігріву пресового інструменту [5].

Після пресування і подальшого охолодження вуглеграфітові вироби, що складаються з вуглецевого наповнювача і органічного сполучного, піддають випалу. Метою випалу є термічна обробка виробів до температури 900-1200°C, при якій органічне сполучне має перейти на кокс і скріпити частинки наповнювача. Випал проводиться зазвичай в закритих багатокамерних кільцевих печах типу Рідгаммера, де нагрів здійснюється теплотою спалюваного природного газу [19, 20]. Внаслідок конструкційних особливостей робота таких печей характеризується інерційністю, некерованістю і досить великою нерівномірністю розподілу температури по камері. Тому з метою зменшення температурного перепаду по заготовках, випал проводять з низькою швидкістю зростання температури, що значно збільшує його тривалість (до 360-720 годин). Для забезпечення цілісності, необхідної щільності і міцності заготовок процес випалу проводять дискретно з різними темпами зростання температури [21, 22]. Вивантаження обпалених виробів здійснюється після повного остигання печі, після чого придатні вироби піддають механічному очищенню від частинок засипки, які спіклися.

Охолодження заготовок після випалу – не менш важлива стадія процесу, ніж нагрів заготовок. Обпалені заготовки охолоджуються в два

етапи: безпосередньо в камері печі в засипці і після вивантаження з камери настелажі.

Дотримання режимів зміщення, охолодження і пресування електродної маси, а також застосування мундштуків заданої геометрії при формуванні дає можливість отримувати високий вихід придатних заготовок.

При випалюванні, самому тривалому процесі, заготовки зазнають значних термохімічних змін, в результаті яких формуються основні властивості майбутніх виробів. Для забезпечення збереження форми і цілісності заготовок, отримання міцного і однорідного за структурою обпаленого матеріалу необхідно строго витримувати всі технологічні параметри випалу.

При необхідності отримання виробів з більш якісними характеристиками після випалу їх піддають просоченням кам'яновугільним пеком, штучними смолами і т.п., після чого вдруге обпалюють.

При подальшій термообробці заготовок в печах графітації вони набувають високу електро- і теплопровідність. В даному випадку потрібне дотримання не тільки електричних режимів графітації, а й схем завантажень заготовок, упаковки печі пересипними і теплоізоляційними матеріалами.

Процес графітування в основному проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого (печі Кастнера), або непрямого нагріву (печі Ачесона), забезпечують рівень температур у виробках 2400-3000 °С [23].

Точна обробка ніпелю і ніпельного гнізда досягається в процесі механічної обробки і в значній мірі впливає на питому витрату електродів у споживача.

За цією схемою виробляють графітовану продукцію. При виробництві вугільних виробів виключається графітація, а товарні маси після змішування і брикетування відправляються споживачеві.

1.4 Аналіз енергоспоживання підприємства

В умовах зростання тарифів на електроенергію дедалі більшої актуальності набуває питання її економії, впровадження сучасних енергозберігаючих заходів. 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 гроші.

Промислові компанії практично завжди споживають більше електроенергії, ніж необхідно, так як використовують дуже потужне обладнання, що живиться від мережі електричного струму. Промислове обладнання не завжди раціональне у витратах, 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. Але сьогодні вирішити дану проблему досить легко, впровадивши абсолютно новий рівень споживання електроенергії, завдяки цьому економія електроенергії на підприємстві стане реальною [24].

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

- застосування нових технологій для енергозбереження;
- впровадження нових технологій виробництва продукції;
- впровадження у виробництво більш досконалого обладнання;
- підвищення можливостей експлуатації і технічного обслуговування виробничого обладнання;

- зменшення втрат в системі постачання заводу електроенергією;
- раціонального використання енергосистеми в години максимальних навантажень.

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

Якість споживаної електроенергії стає важливим моментом роботи електроустаткування заводу. Економія електроенергії на підприємстві без застосування засобів, які роблять 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 промисловій компанії вийти на новий рівень енергоспоживання, економити на витратах електроенергії за допомогою сучасного енергозберігаючого та облікового обладнання [24].

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

Енергетичний аудит – це енергетичне обстеження об'єктів з метою визначення можливості економії паливно-енергетичних ресурсів, здійснення заходів з економії шляхом упровадження механізмів енергетичної ефективності, а також з метою впровадження на підприємстві системи енергетичного менеджменту [25].

Енергетичний аудит дозволяє визначити наскільки ефективно використовуються паливно-енергетичні ресурси та розробити рекомендації для скорочення їх споживання [26].

Енергетичний аудит може бути комплексним (обстежується все підприємство на предмет економії всіх видів енергоресурсів) або вибіркоvim (обстежуються окремі види енергоносіїв, окремі підрозділи підприємств) [25]. Для отримання відносно великого економічного ефекту, вперш за все необхідно знизити втрати на найбільш енергоємних підрозділах підприємства.

Але по-перше, необхідно обстежити все підприємство та визначити який вид енергоресурсу є найбільш споживаним.

Основними енергоресурсами на підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» є електроенергія, водяна пара та природний газ. На рисунку 1.2 представлені обсяги споживання енергоресурсів за 2018-2020 роки.

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

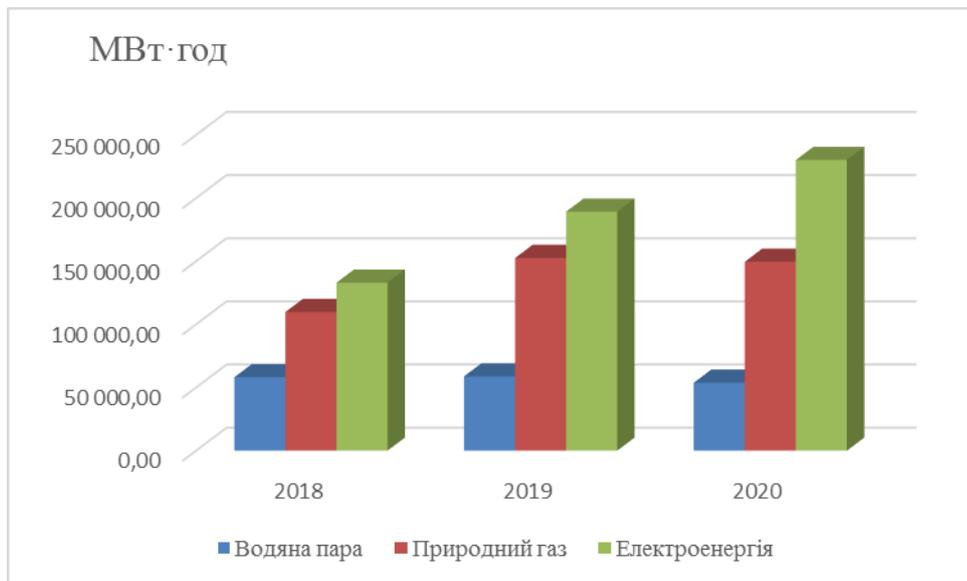


Рисунок 1.2 – Обсяги споживання енергоресурсів

З гістограми видно, що найбільш споживаним енергоресурсом на підприємстві є електроенергія. Для того, щоб знизити витрати підприємства на електроенергію, необхідно побудувати баланс її річного споживання за структурними підрозділами. Це дасть можливість виявити найбільш енергоємні дільниці, в яких буде доцільним впровадження

енергозберігаючих заходів. Для цього в таблиці 1.1 наведено споживання електроенергії за підрозділами

Таблиця 1.1 – Споживання електроенергії структурними підрозділами

Підрозділ	Обсяг електроенергії, МВт·год		
	2018 рік	2019 рік	2020 рік
Цех №1	8 614,97	17 297,58	14 419,42
Цех №2	9 316,86	13 185,46	10 926,72
Цех №3	5 424,94	8 643,01	11 214,95
Цех №4	90 397,45	127 654,51	169 459,91
Цех №5	4 211,32	5 733,63	6 422,46
Цех №8	7 934,13	8 478,33	9 843,57
Опалення	2 533,54	2 742,13	2 708,36
Інші	3 213,62	3 235,74	3 122,65
Втрати	1 331,84	2 326,86	2 054,14
Всього	132 978,65	189 297,24	230 172,18

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

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

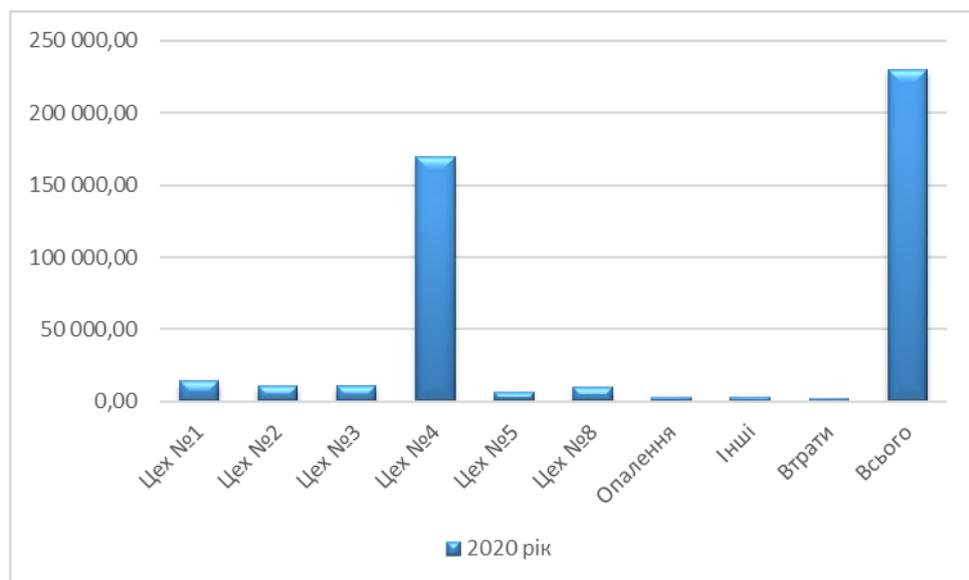


Рисунок 1.3 – Споживання електроенергії на підприємстві за 2020 рік

На рисунку 1.3 представлена гістограма споживання електричної енергії підрозділами у відсотковому співвідношенні за даними 2020 року. Аналіз показав, що найбільше електричної енергії споживає цех графітації №4.

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.

Після виявлення найголовнішого споживача електроенергії, необхідним є визначення того, як саме обсяги виробництва графітованих заготовок впливають на обсяги споживання електричної енергії.

Обсяги виробництва графітованих електродів та споживання при цьому електроенергії відповідно встановленим лічильникам відображено в таблиці 1.2. На ній видно, що зміни споживання електричної енергії протягом року пов'язані з попитом на продукцію підприємства при різних обсягах її виробництва.

Таблиця 1.2 – Обсяги виробництва графітованих електродів та споживання електроенергії за 2020 рік печами графітації

Період	Обсяг виробництва, тонн	Споживання електроенергії, МВт·год
Січень	1 689,5	9 236,5
Лютий	1 811,6	11 731,3
Березень	2 424,2	12 916,1
Квітень	2 136,0	11 029,4
Травень	2 002,6	11 482,9
Червень	2 007,0	11 134,8
Липень	2 120,4	11 327,2
Серпень	2 210,3	11 495,8
Вересень	2 145,0	12 053,3
Жовтень	2 166,9	12 052,3
Листопад	2 166,0	12 710,7
Грудень	1 804,2	9 598,3
За рік	24 683,7	136 768,7

На виробництво 1 тонни графітованих електродів питомі витрати електроенергії у середньому складають 5,5 МВт·год.

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 2020 рік згідно постанов НКРЕКП наведені у таблиці 1.5 [27]. Також у таблиці 1.3 наведені витрати на електричну енергію у грошових одиницях. На рисунку 1.4 за таблицею 1.3 зображено залежність витрат на електроенергію від обсягу електроспоживання печей графітації.

Таблиця 1.3 – Витрати на споживану електроенергію печами графітації за 2020 рік у грошових одиницях

Період	Електрична енергія, МВт·год	Тариф, грн/МВт·год	Витрати на електричну енергію, тис. грн
Січень	9 236,50	1 762,60	16 280,25
Лютий	11 731,34	1 808,00	21 210,26
Березень	12 916,14	1 765,00	22 796,98
Квітень	11 029,38	1 698,80	18 736,71
Травень	11 482,91	1 696,10	19 476,16
Червень	11 134,77	1 728,00	19 240,88
Липень	11 327,18	1 731,20	19 609,61
Серпень	11 495,77	1 754,90	20 173,93
Вересень	12 053,33	1 774,60	21 389,83
Жовтень	12 052,30	1 800,50	21 700,16
Листопад	12 710,74	1 796,10	22 829,76
Грудень	9 598,34	1 791,50	17 195,43
За рік	142 856,68	-	256715,96

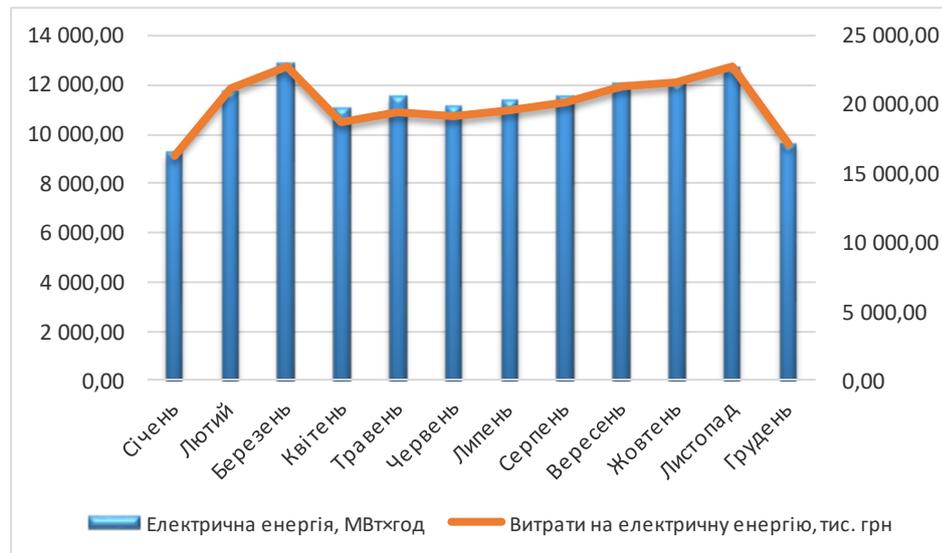


Рисунок 1.4 – Залежність витрат підприємства на електроенергію від обсягу електроспоживання печей графітації

За таблицею 1.3 видно, що витрати на електроенергію кожного місяця різні, тобто споживання електричної енергії коливається, як і тарифи на неї.

На рисунку 1.4 спостерігається пряма 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.

Втрати електроенергії печами графітації у 2020 році склали 142,8 МВт·год, на цю споживану енергію підприємство витратило 256,6 млн. грн.

Оскільки за останні роки спостерігається постійний зріст тарифу на електроенергію, а найбільше електроенергії споживають печі графітації, тому впровадження заходів підвищення ефективності електроспоживання саме цього обладнання є економічно доцільним.

2 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1 Аналіз факторів, що впливають на якість електроенергії промислових підприємств

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

До основних показників якості електроенергії 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) [28].

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 електроенергії, який характеризується збільшенням втрат електроенергії, виходом з ладу електротехнічного обладнання, порушенням роботи автоматики, телемеханіки, зв'язку і т. д.

Порушення показників якості електроенергії може бути обумовлено як живлячою енергосистемою, так і приймачами електричної енергії, які працюють на промислових підприємствах.

Частота регулюється на електричних станціях залежить тільки від їх режимів роботи.

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

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. Ці властивості визначають одночасно процес вироблення і споживання електроенергії.

При генерації та споживанні енергії на змінному струмі, кількість виробленої і споживаної електроенергії, в кожен момент часу, відповідає кількості переданої і споживаної активної та реактивної потужності, які можуть бути записані у вигляді балансів активної і реактивної потужності [29].

$$\sum P_2 = \sum P_H + \sum \Delta P,$$

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

де $\sum P_2$ – сумарна активна потужність, що генерується;

$\sum Q_2$ – сумарна реактивна потужність, що генерується;

$\sum P_H$ та $\sum Q_H$ – сумарні активна і реактивна потужності споживачів;

$\sum \Delta P$ – сумарні втрати активної потужності в мережах;

$\sum Q_{нк}$ – сумарна реактивна потужність пристроїв компенсації;

$\sum Q_{нл}$ – сумарна реактивна потужність, повітряних ліній;

$\sum \Delta Q$ – сумарні втрати реактивної потужності в мережах.

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.

Баланс реактивної потужності слід передбачати для кожного характерного режиму мережі окремо. Це такі режими:

а) режим максимальних навантажень, в цьому режимі найбільші втрати потужності, енергії та напруги. За результатами розрахунку цього режиму вибираються всі елементи електричної мережі (перетини ліній, номінальні потужності силових трансформаторів і т. д.);

б) 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 (ЛЕП, трансформатори);

в) післяаварійні режими, за результатами розрахунків яких оцінюється перевантажувальна здатність елементів мережі, а також рівні напруги у вузлах мережі.

Баланс реактивної потужності визначає рівень напруги у вузлах електричних мереж. Рівень напруги є одним з найважливіших показників режиму електричних мереж.

Значення напруги в вузлах мережі в тій чи іншій мірі відрізняються від середнього рівня, причому ступінь цієї відмінності залежить від конфігурації мережі, величини навантаження та інших факторів, що визначають спад напруги.

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

Згідно ГОСТ 13109 – 97 різниця між дійсним значенням напруги і його номінальним значенням – це відхилення напруги. Цей показник так

само має назву усталеного відхилення напруги (δU_y), для якого встановлені нормально і гранично допустимі значення на вводах приймачів електроенергії ($\pm 5\%$ та $\pm 10\%$ відповідно від номінального значення напруги) [29].

Допустимі значення δU_y у точках загального приєднання споживачів напругою 0,38 кВ і більше повинні бути встановлені в договорах на користування електричною енергією.

Значення усталеного відхилення напруги визначають за формулою

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

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

U_y – дійсна напруга у вузлі мережі.

Зміна сталого відхилення напруги ΔU_y здійснюється для кожного і-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 нормальнодопустимими значеннями.

При відхиленні фактичного значення напруги на виводах приймача електроенергії від номінального, його робота відбувається в гірших умовах [30,31,32].

Відхилення напруги від номінального порушує технологічний режим роботи електропечі, плавки металу. При зниженні напруги на 7% процес плавки сталі, подовжується в 1,5 рази. Підвищення напруги вище $1,05 U_{ном}$ призводять до перевитрати електроенергії [33].

Зниження напруги на зварювальних електроустановках погіршує якість зварювання [33].

Зниження напруги на лампах розжарювання зменшує світловий потік і знижує освітленість. Так при зниженні напруги на 10% світловий потік знижується приблизно на 30%, а при підвищенні на ті ж 10% термін служби ламп розжарювання скорочується майже в 5 разів, а термін служби люмінесцентних ламп знижується на 20 – 30% [33,34].

При зниженні напруги на 20% і більше у газорозрядних ламп, в тому числі і у люмінесцентних, знижується запалювання або стає неможливим.

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 [31]

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

де P , Q – активна і реактивна потужність;

S – повна потужність.

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

$$Q_{KB} = U^2 \cdot \omega_0 \cdot C_{KB},$$

де C_{KB} – ємність конденсатора.

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.

Таким чином, нормальна робота приймачів електроенергії гарантується при нормальній напрузі і його відхиленнях в межах, зазначених у ГОСТ 13109– 97.

Однак, слід відзначити, що навіть при менших, ніж зазначено в ГОСТі 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. [35].

Допустимі значення відхилень напруги, встановлені ГОСТом, обґрунтовані технічно і економічно, оскільки при більш жорстких вимогах збільшуються витрати на регулювання напруги. У той же час на сьогоднішній день вже існують способи регулювання за допомогою сучасних пристроїв статичних тиристорних компенсаторів (СТК) та регульованих конденсаторних батарей (КБ).

2.2 Рівні напруги в системах електропостачання промислових підприємств

Щоб визначити фактори, що впливають на рівні напруги, потрібно розглянути принципову схему електропостачання одного з промислових підприємств і схеми заміщення кожної гілки, так як в кожному випадку параметри активного и реактивного опору різні.

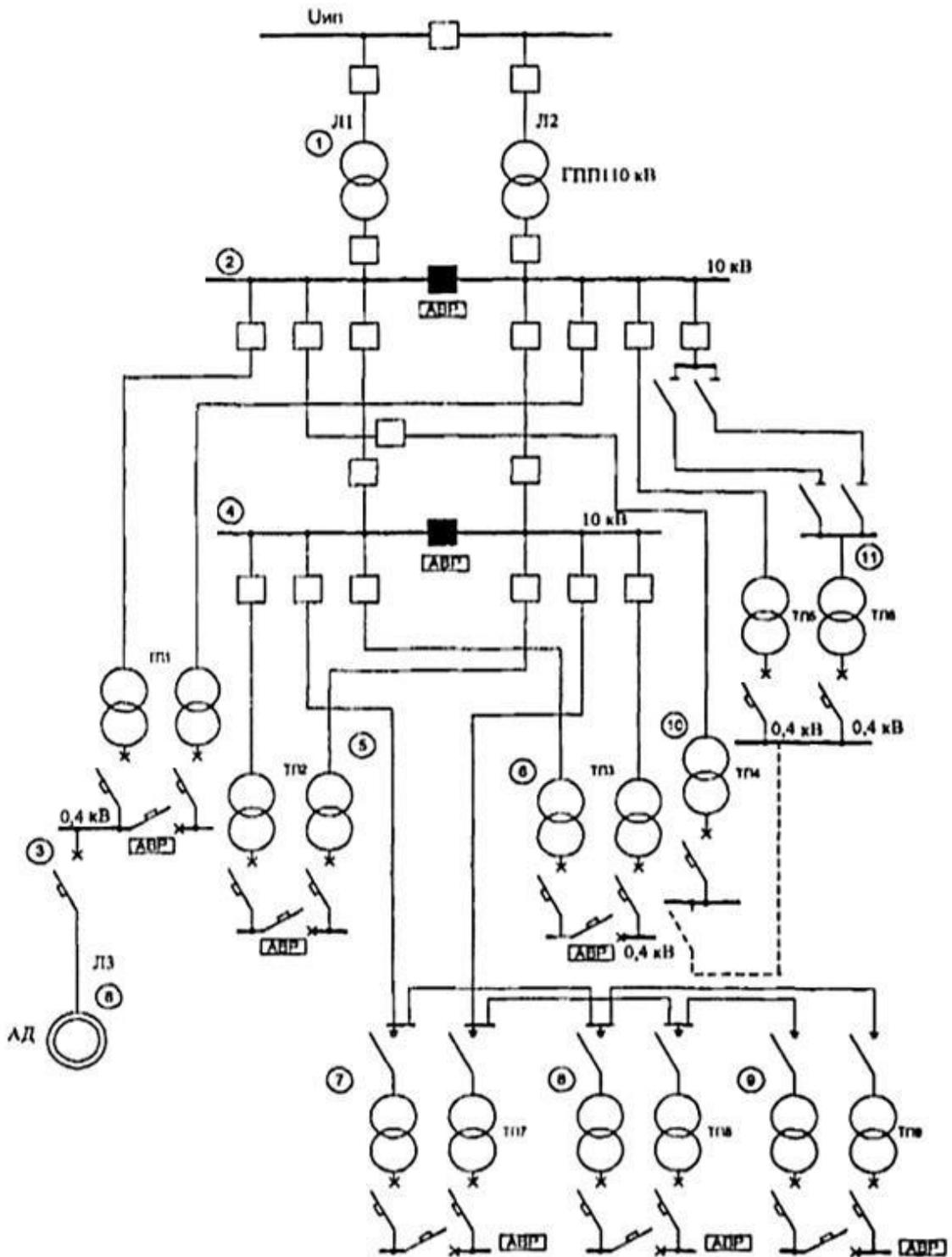


Рисунок 2.1 – Принципова схема електропостачання підприємства

Кожну гілку схеми рисунку 2.1 можна представити схемою заміщення (рисунок 2.2 і 2.3), параметри якої R і X в кожному випадку індивідуальні.

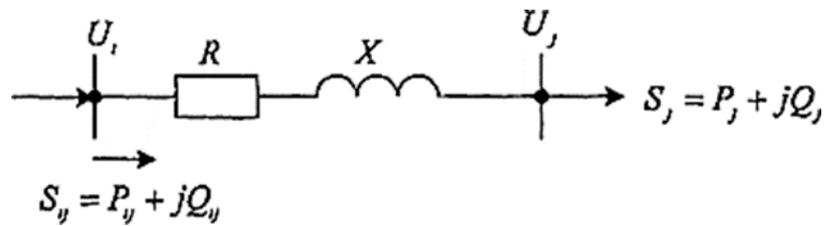


Рисунок 2.2 – Схема заміщення лінії

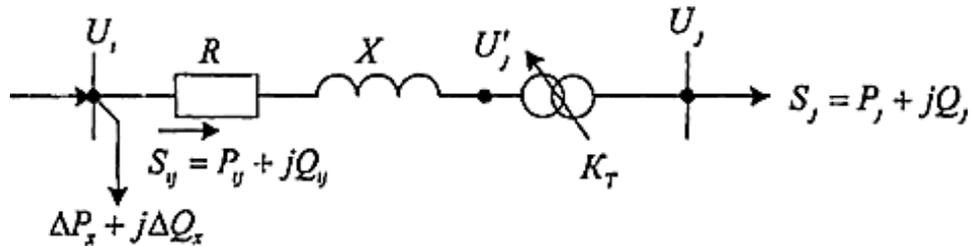


Рисунок 2.3 – Схема заміщення трансформатора

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

$$\Delta U_y = \frac{P_y R + Q_y X}{U_i},$$

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 у вузлі j для схеми (рисунок 2.2) визначається за виразом:

$$U_j = U_i - \Delta U_y.$$

Для схеми (рисунок 2.3):

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

де K_f – коефіцієнт трансформації силового трансформатора.

Розглянемо, як приклад кілька вузлів схеми рисунку 2.1.

Для вузла 1:

$$U_1 = U_\delta - \Delta U_{Л1} = U_\delta - \frac{P_L R_1 + Q_L X_1}{U_\delta},$$

де P_L, Q_L – 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, наведена до вищої напругу трансформатора:

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

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 ГЗП:

$$U_2 = \frac{U_2'}{K_T},$$

Для вузла 3:

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

- 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:

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

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

R_3, X_3 – активний і реактивний опір лінії ЛЗ.

Якщо в цій схемі не вживати ніяких заходів щодо підтримки напруги на необхідному рівні, то очевидно, що для ряду вузлів рівні напруги U_i перевищать допустимі значення.

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

Неправильна побудова схем електричних мереж систем електропостачання, живлячих, розподільних або цехових. Живлячі і розподільні мережі (мережі вище 1000 В) зазвичай по втратах напруги не перевіряють, але при магістральних схемах живлення не рекомендується по одній лінії жити більше чотирьох – п'яти підстанцій [35]. Цехові мережі повинні обов'язково перевірятися по допустимій втраті 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 ГОСТу [28].

Коефіцієнти трансформації силових трансформаторів (ГЗП, ТП). На ГЗП коефіцієнти трансформації змінюються під навантаженням за рахунок пристрою РПН (регулювання під навантаженням), і на цехових ТП за рахунок пристрою ПБЗ (перемикання без збудження).

Таким чином, фактори, що впливають на відхилення напруги в мережі представлені на рисунку 2.4.

Таким чином за рисунком 2.4, факторами, що впливають на рівні напруги в мережі є:

- втрати напруги, що викликаються струмами навантаження, що проходять по елементам мережі. Втрати напруги безперервно змінюються і залежать від режиму роботи мережі живлення, від режиму роботи

приймачів електричної енергії, пов'язаного з технологічним процесом і графіком роботи підприємства;



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

- параметри елементів електричної мережі, (трансформаторів, ліній електропередачі). Неправильний вибір перетинів ліній (кабельних, повітряних, шинопроводів) і потужності силових трансформаторів впливає на втрати напруги за рахунок зміни опорів цих елементів;
- неправильна побудова схем електричних мереж СЕП,

живлячих, розподільних або цехових. Живлячі і розподільні мережі (мережі вище 1000 В) зазвичай по втратах напруги не перевіряють, але при магістральних схемах живлення не рекомендується по одній лінії живити більше чотирьох – п'яти підстанцій. Цехові ж мережі повинні обов'язково перевірятися по допустимій втраті 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 ГОСТу [28];

- коефіцієнти трансформації силових трансформаторів (ГЗП, ТП). На ГЗП коефіцієнти трансформації змінюються під навантаженням за рахунок пристрою РПН (регулювання під навантаженням), і на цехових ТП за рахунок пристрою ПБЗ (перемикання без збудження);

- напруга на шинах джерела живлення промислового підприємства $U_{дж}$

У зв'язку з вищезазначеним, виникає необхідність підтримки напруги в різних вузлах мережі в допустимих межах, що зумовлює необхідність його регулювання.

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 [28], застосовуються різні способи і засоби регулювання напруги: на шинах центру живлення, зміна опорів 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 батарей конденсаторів і статичні тиристорні компенсатори (СТК).

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, пов'язаного з виникненням різко змінних навантажень.

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

- виділення приймачів електричної енергії з різко змінним навантаженням на живлення за самостійними лініями безпосередньо від джерела електроенергії;
- застосування паралельної роботи живлячих ліній і трансформаторів на ГЗП з урахуванням викликаного цим режимом збільшення струмів КЗ;
- 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 (± 2) відпайки, рідше – 6 (± 3) з кроком регулювання 2,5% [36].

Тому протягом доби трансформатори з 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, вбудоване на лінійному кінці обмотки середньої напруги. Раніше пристрій РПН виконувалося вбудованим до нейтралі.

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.

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

Складова падіння напруги в мережі ΔU_M визначається за формулою:

$$\Delta U_M = \frac{P_M R_M + Q_M X_M}{U_M},$$

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 надає складова: $\frac{Q_m X_m}{U_m}$.

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

$$U_2 = U_1 - \frac{P_m R_m + (Q_m \pm Q_{пк}) X_m}{U_2},$$

де U_1 – напруга на початку розглянутої ділянки;

U_2 – напруга в точці установки пристрою компенсації;

$Q_{пк}$ – 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 пов'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).

Збільшення перерізу струмоведучих елементів – дуже складне, часто неефективне і 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 [31].

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

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 [37,38].

Аналіз способів регулювання напруги в електричних мережах показує, що для промислових мереж найбільш характерними є зміна коефіцієнтів трансформації трансформаторів і зміна втрат напруги за рахунок регулювання потоків реактивної потужності. Причому перший спосіб використовується для централізованого регулювання напруги у всій системі електропостачання підприємства, а другий для місцевого регулювання напруги в цехових мережах і на затискачах окремих 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

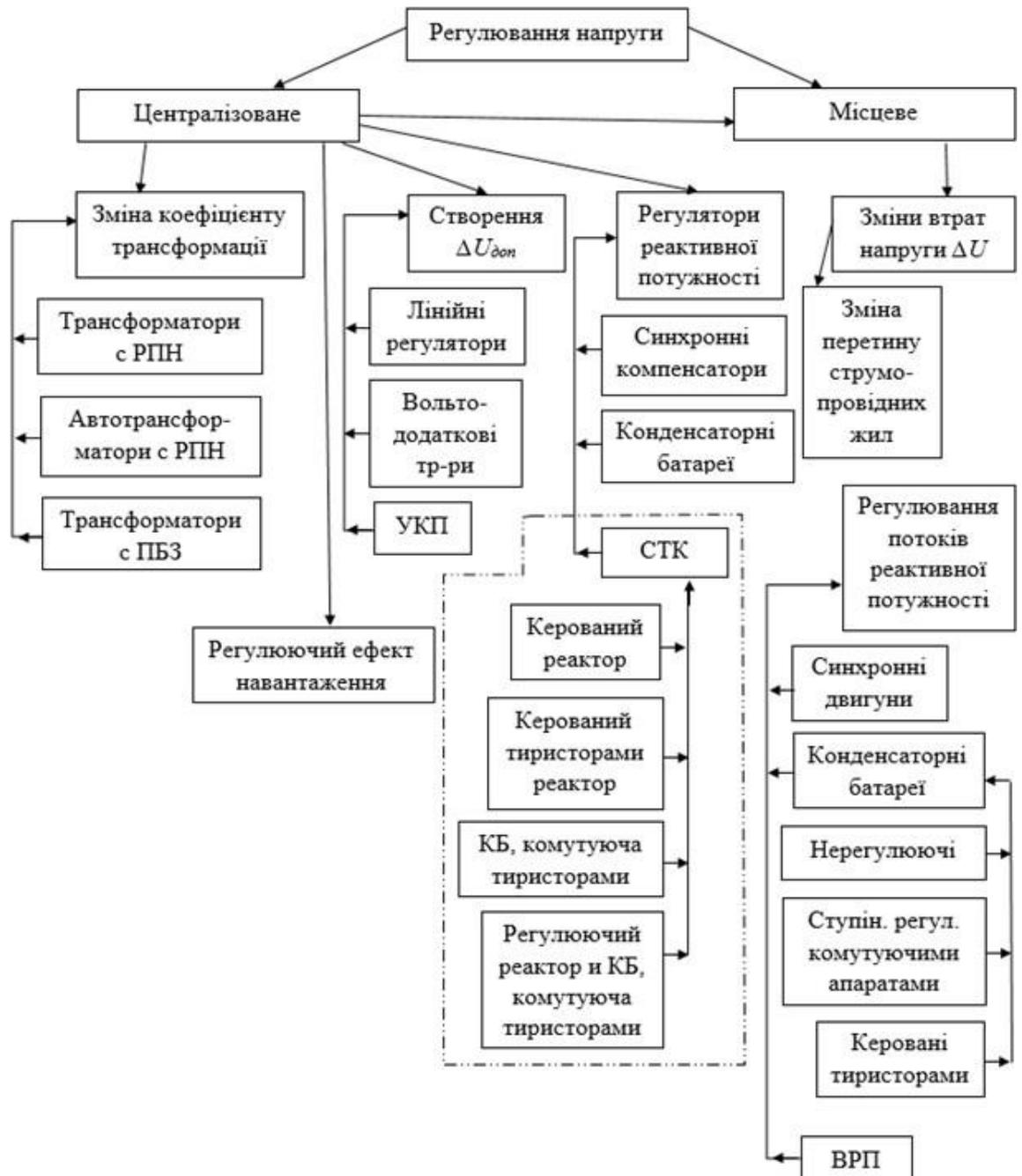


Рисунок 2.5 – Класифікація способів і засобів регулювання напруги велектричних мережах

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 [38]. Але 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:

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

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

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

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

де X_y – реактивний опір кола джерело живлення.

Для ПК, підключених на шинах 380 В цехових підстанцій, регулюючий ефект можна визначити приблизно як:

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

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

X_T – його індуктивний опір рівний у відносних одиницях напруги короткого замикання трансформатора $U_{кз}$.

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

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

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

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

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

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

Графітація – це процес термічного перетворення неграфітових вуглецевих матеріалів в графіт.

Процес графітації проводиться в спеціальних печах електричного опору прямого нагріву. Опором, у цих печах при графітуванні електродів є саме завантаження печі, тобто електроди і пересипання, а при отриманні штучного порошкоподібного графіту – зернистий вуглецевий матеріал. Нагрів проводиться до високих температурах, які досягають 2500 °С. Незважаючи на зовнішню простоту, ці печі вимагають уважного догляду і великої ретельності при спорудженні [6].

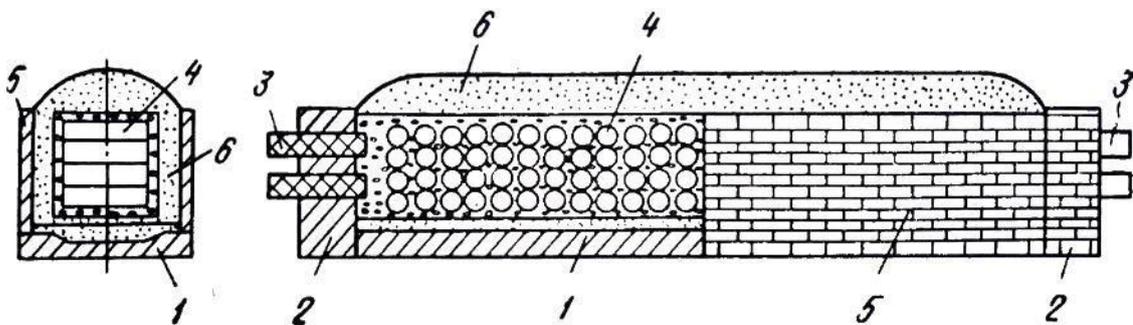
Піч складається з прямокутного корита, викладеного із шамотної цегли, і двох торцевих стінок. Через постійні торцеві стінки проходять

струмопровідні електроди . До цих електродів підводиться електричний струм від потужних джерел струму. В кориті з суміші вуглецевих матеріалів і піску набивається подина, на яку між електродами перпендикулярно осі печі укладаються вироби, які є одночасно нагрівальним опором. Бічні стінки печі іноді роблять розбірними і кожну кампанію збирають і розбирають. Простір між завантаженим керном і бічними стінками заповнюють теплоізоляційною шихтою.

В процесі роботи печі торцеві і бічні стіни відчувають значні теплові і механічні навантаження з боку розігрітій робочої зони. Тому для збереження цілісності печі по її периметру встановлюють залізобетонні колони, нижні торці яких закладають в бетонну основу [5].

Електрична енергія підводиться до робочого об'єму (керна) за допомогою електродів. Струмопровідні 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 завантаження печі графітації.

Процес графітування виробів надзвичайно енергоємний. Виходячи з теплоємності обпалених заготовок [5] можна оцінити кількість енергії необхідної для графітування одного моля вуглецевовмістної 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·г/т (до 6500 кВт·г/т при графітуванні особливо якісних виробів) [22]. Тривалість процесу графітування от 36 до 120 ч.

Сила струму в сучасних печах досягає декількох десятків тисяч ампер, тому електродний пакет повинен бути складений з такого числа електродів, щоб загальний їх перетин задовольняв вимогам по допустимій щільності струму. Найчастіше використовуються графітові електроди, так як вони мають високу електропровідність і допускають високі щільності струму (до 12 А/см²)[23].

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 встінку.

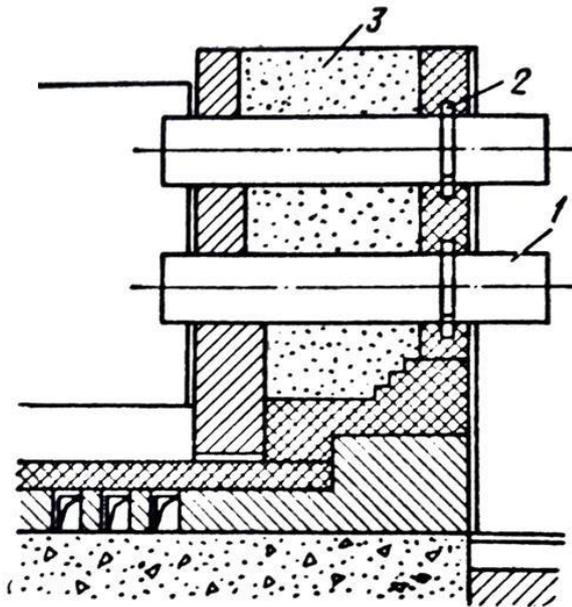
Рівномірне підведення струму в цьому випадку повинно забезпечуватися за рахунок заповнення простору між струмопровідним пакетом і керном зерновим матеріалом з більшою електропровідністю.

Особливістю цих пічних установок є живлення групи печей від одного 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[5].

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

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

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



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

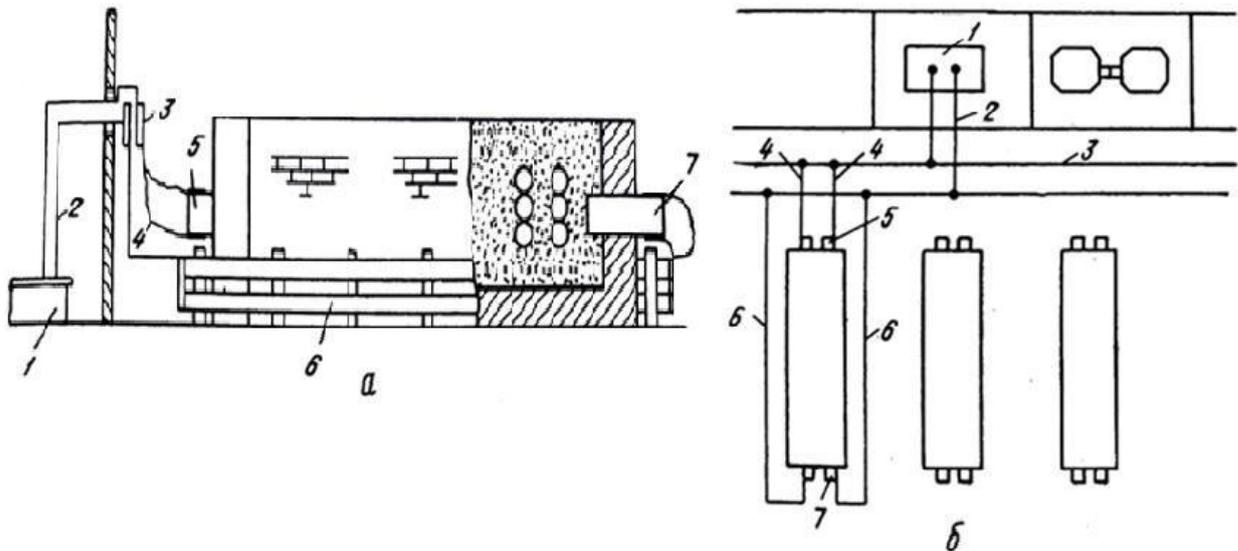
Рисунок 2.7 – Схема закладання струмопровідних електродів

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 стіні. Довжина пакета визначається кількістю і розмірами печей в секції [23].

Від головного шинного пакета через роз'єднувачі і гнучкі або жорсткі зв'язки струм підводиться до пічного ошинування. Ошинування малої петлроблять постійною, 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 [23].

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 пічної петлі для великих печей досягає 30 м [5].



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

Рисунок 2.8 – Схема електричної короткої мережі печі графітації

Електропостачання секцій печей графітації здійснюється підстанцією ПС-2 цеху №9.

Цех №9 ПрАТ «Укрграфіт» – це цех електропостачання, автоматизації та ремонту технологічного обладнання. Він здійснює безперервне електропостачання споживачів заводу електроенергією, займається проведенням всіх видів ремонтних робіт і оперативним обслуговуванням електроустаткування цеху, виконує достовірний облік отриманої і відпущеної електроенергії.

Персонал цеху підрозділяють на:

- оперативний – який здійснює нагляд за обладнанням, проводить цілодобове і періодичне його обслуговування, а також ведення режимів графітації електродів;

– ремонтний – який виконує ремонтні роботи, замінює і модернізує обладнання, проводить заходи для покращення експлуатації обладнання;

– лабораторний – який проводить профілактичні випробування і перевірки.

До електрообладнання цеху, обслуговуванням якого він займається, належать:

- головна знижувальна підстанція «Графіт» – 150/10кВ;
- трансформаторна підстанція ПС-2 – 10/0,24кВ;
- перетворювальна підстанція ПП-4 – 10/0,3кВ;
- 2 розподільні підстанції – 10/0,4кВ;
- 15 комплектних трансформаторних підстанцій – 10/0,4кВ;
- 9 підстанцій з силовими трансформаторами – 10/0,4кВ.

ГЗП «Графіт» призначена для електропостачання підрозділів підприємства і сторонніх споживачів напругою 10кВ і складається з:

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

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

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

Головною метою ПС-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 №5,6, а також експлуатація та оперативне обслуговування електроустаткування ПС-2 і пічних секцій змінного струму.

На першому поверсі ПС-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»;

- комп'ютер «Мнемосхема електропостачання ГЗП« 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 розміщені:

- комплектний розподільний пристрій пічних секцій №5,6;

- комплектний розподільний пристрій силових споживачів;

- шафа оперативного струму;

- блок живлення напруги стабілізованого;

- блок живлення розподільчого пристрою;

- розподільні пункти власних потреб;
- шафа аварійного вводу резерву власних потреб.

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

Саме оперативний персонал цеху №9 займається веденням електричних режимів процесу графітації пічних секцій цеху графітації №4.

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

Таблиця 2.1 – Номінальні параметри пічних і компенсаційних трансформаторів.

Параметр	ПТ-1	ТК-1,2
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

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.

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.

В даний час до півної 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 внутрішньоїустановки, напругою 10,5 кВ та потужністю 75 кВАр.

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

Напруга від головного шинного пакету підвищується трансформаторами ТК-1,2 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 вручну. При кожному підключенні секції КУ, потрібно дочекатися, щоб значення $\cos\phi$ дорівнювало 0,85 після чого відключається півна секція.

Після відключення оперативний персонал підстанції ПС-2 цеху № 9 вручну вмикає роз'єднувач однієї з секцій КУ, це все займає час та призводить до споживання реактивного потужності в період між вмиканням секцій КУ.

На рисунку 2.9 зображена електрична схему півної секції №5 цеху №9

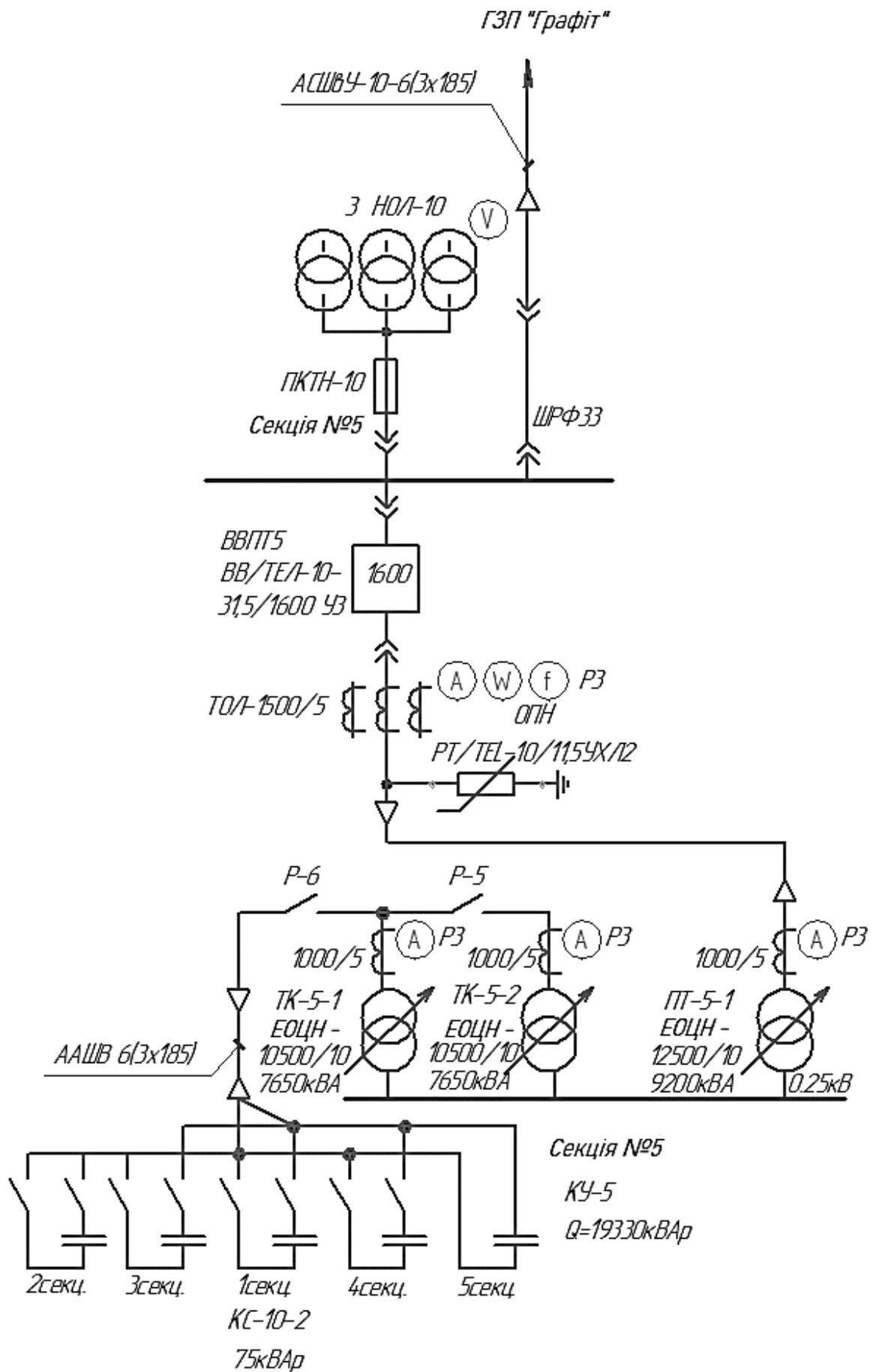


Рисунок 2.9 – Електрична схема пічної секції №5

На початку компанії $\cos \varphi$ дорівнює 0,96 та поступово зменшується на протязі всієї компанії, для його поліпшення і використовуються конденсаторні батареї. Вже в кінці компанії $\cos \varphi$ 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 $\cos \varphi$ 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 [39].

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

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 відчутню 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 [39].

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

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЦЕХОМ №9

3.1 Джерела реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств

В якості основного джерела реактивної потужності, яке забезпечує споживачів промислового підприємства реактивною потужністю, понад ту кількість, яку можливо і доцільно отримати від енергосистеми, застосовуються конденсаторні батареї. Вони встановлюються як в мережах з напругою 6 – 10 кВ, так і в мережах з напругою 660 і 380 В.

Конденсаторні установки (КУ) призначені для генерації реактивної потужності. Сумарна генеруюча потужність 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 окремих її частин.

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.

КБ і живляча мережа утворюють контур, відносна резонансна частота якого визначається:

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{КЗ}}{Q_{КБ}}},$$

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

$Q_{КБ}$ – генеруюча потужність батареї.

При передачі споживачам активної P і реактивної Q потужності в системі електропостачання є втрати активної потужності

Втрати потужності можна розрахувати за формулою:

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

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

Враховуючи, що коефіцієнт потужності

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

знаходимо ΔP :

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

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

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

Основні переваги КБ наступні [29]:

- малі питомі втрати активної потужності (0,0025-0,005 Вт/ВАр);

- простота виробництва монтажних робіт (малі габарити, маса, відсутність фундаментів);
- простота експлуатації (зважаючи на відсутність частин, що обертаються і труться);
- можливість їх установки в центі реактивних навантажень або біля електроприймачів;
- для установки конденсаторів може бути використане будь-яке сухеприміщення;
- 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

$$Q_{KB} = 3\omega_{\phi} C_{\phi} U^2,$$

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

$$Q_{KB} = \omega_{\phi} C_{\phi} U^2.$$

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

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

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

де v – порядковий номер гармоніки;

U_v – діюче значення напруги цієї гармоніки.

З формули (3.7) видно, що при наявності вищих гармонік діючі значення струму і напруги не дають уявлення про реактивну потужність, однак конденсаторна батарея відчуває навантаження реактивної потужності [35].

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

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

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 будові конденсаторів, процес заснований на використанні нових ізоляційних матеріалів і просочувальних рідин, дозволив створити конденсатори з питомими втратами 0,1 – 0,5 Вт/кВАр [40].

Застосування саме таких конденсаторів робить економічно доцільним підвищення ступеня компенсації реактивної потужності до 1 кВАр/кВт [41].

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

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

$$Q_{КБ} = Q_{КБ_{ном}} \cdot k_U^2 \cdot k_f^2,$$

де $Q_{КБ}$ – 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.

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

$$Q_{MIN} \leq Q_{КУ} \leq Q_{MAX}.$$

Введення джерел реактивної потужності призводить до зниження втрат період максимального навантаження в середньому на 0,081 кВт/кВАр [37]. 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 всі групи промислових мереж в залежності від складу їх навантажень [42]:

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 ГЗП [34].

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

де $P_{расч.}$ та $Q_{расч.}$ – 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 3.1.

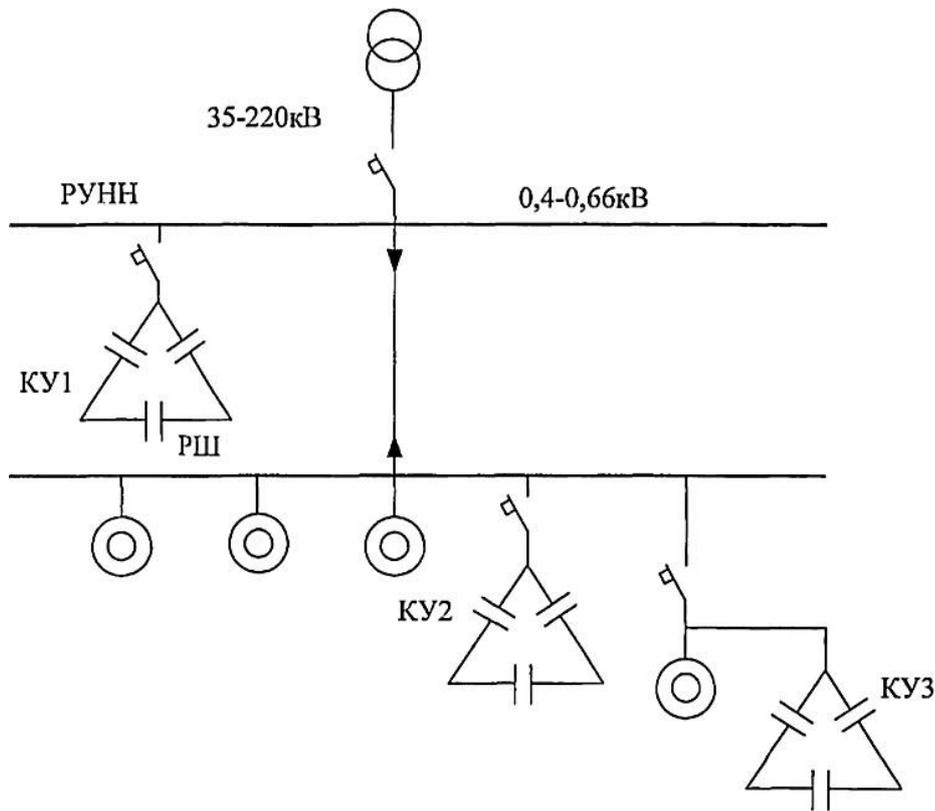


Рисунок 3.1 – Установка КБ у цеховій мережі

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.

Однак це означає, що застосування індивідуальної компенсації виправдано, тільки якщо вона застосовується в пристроях і установках з дужехорошим 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 електричну мережу промислового підприємства представити у вигляді еквівалентного опору R_e , і навантаження P_e і Q_e [34], то втрати потужності в такій мережі будуть рівні:

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

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

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

$$\Delta U \cong \frac{Q_{ку} \cdot X_T}{U_{2ном}},$$

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.

$$\Delta A = \Delta P \cdot \Delta t,$$

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 3.2, 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.

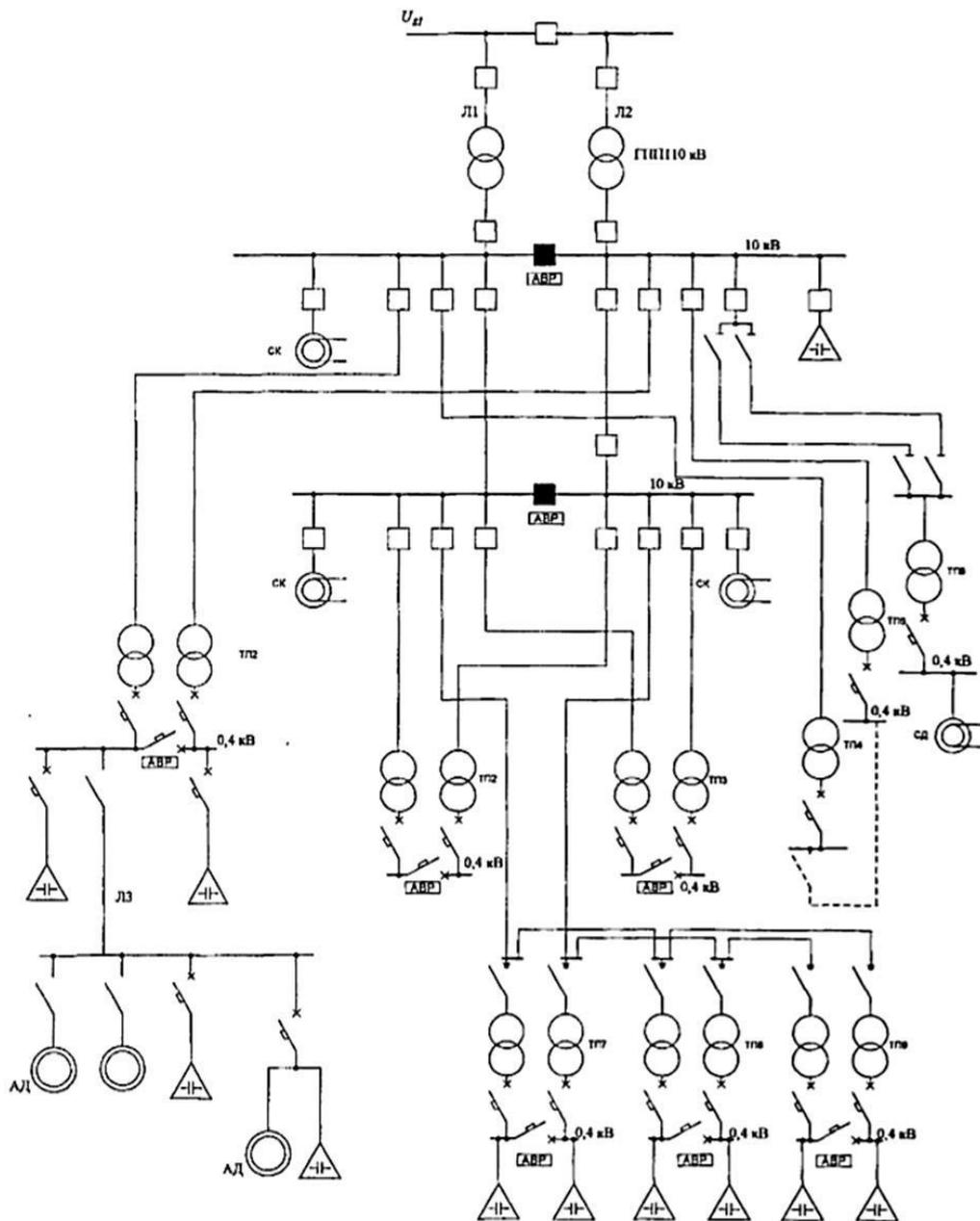


Рисунок 3.2 – Розміщення КУ в СЕП підприємства

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

3.2 Аналіз схем пристроїв компенсації реактивної потужності

Електричні схеми пристроїв компенсації на базі конденсаторних батарей досить різноманітні [30,33,40,43]. Розглянуто ті, які було застосовано в системі електропостачання промислових підприємств, і які є перспективними.

На рисунку 3.3 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.

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

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

$$\Delta P = 2\pi \cdot f \cdot C_{КБ} \cdot U_{ном}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta ,$$

де f – частота мережі;

$C_{КБ}$ – ємність конденсаторної батареї;

$U_{ном}$ – номінальна напруга КБ;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута втрат в конденсаторах, Вт/квар.

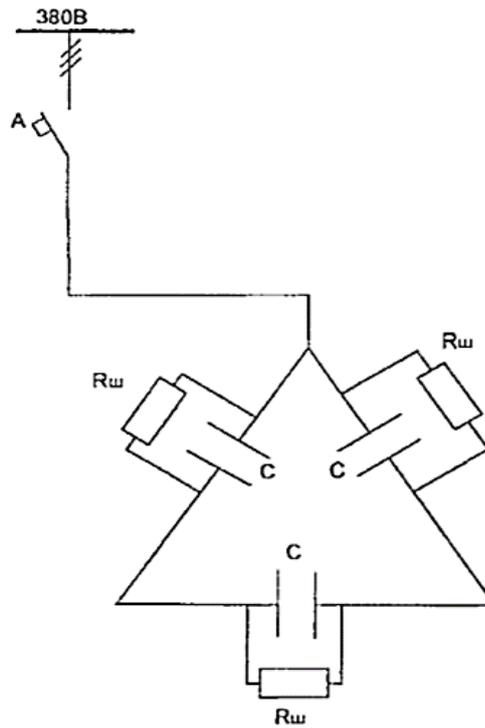


Рисунок 3.4 – Схема нерегульованого компенсуючого пристрою
Однак втрати потужності (ΔP) в електричній мережі промислового підприємства при такому пристрої компенсації – максимальні [32].

Схема з регульованою ємністю з перемиканням конденсаторів з трикутника на зірку, рисунок 3.5. В цьому випадку компенсуючий пристрій має дві нерівномірні ступені реактивної потужності.

Схема «трикутник» відповідає потужності $Q_{ПКmax}$, а в схемі «зірка» – $Q_{ПКmin}$.

При з'єднанні зіркою

$$Q_{KB} = C\omega U_{\phi}^2.$$

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

$$Q_{KB} = 3C\omega U_{\phi}^2.$$

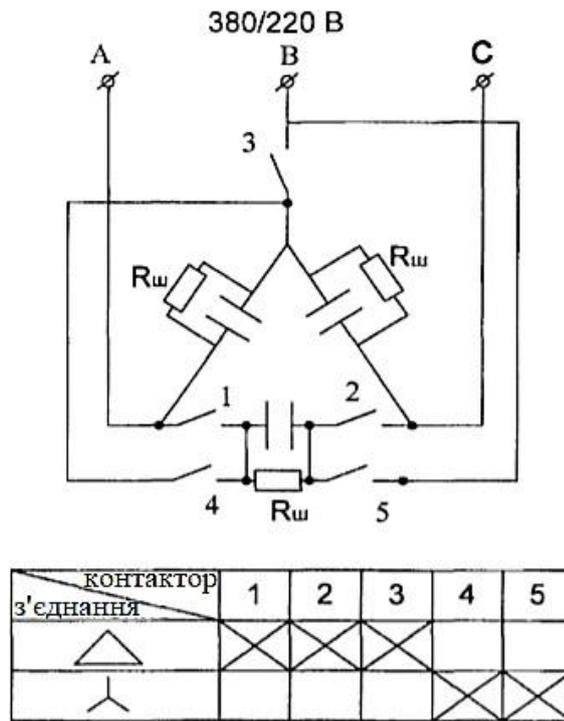


Рисунок 3.5 – Схема з регульованою ємністю

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 3.5 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 3.6).

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

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

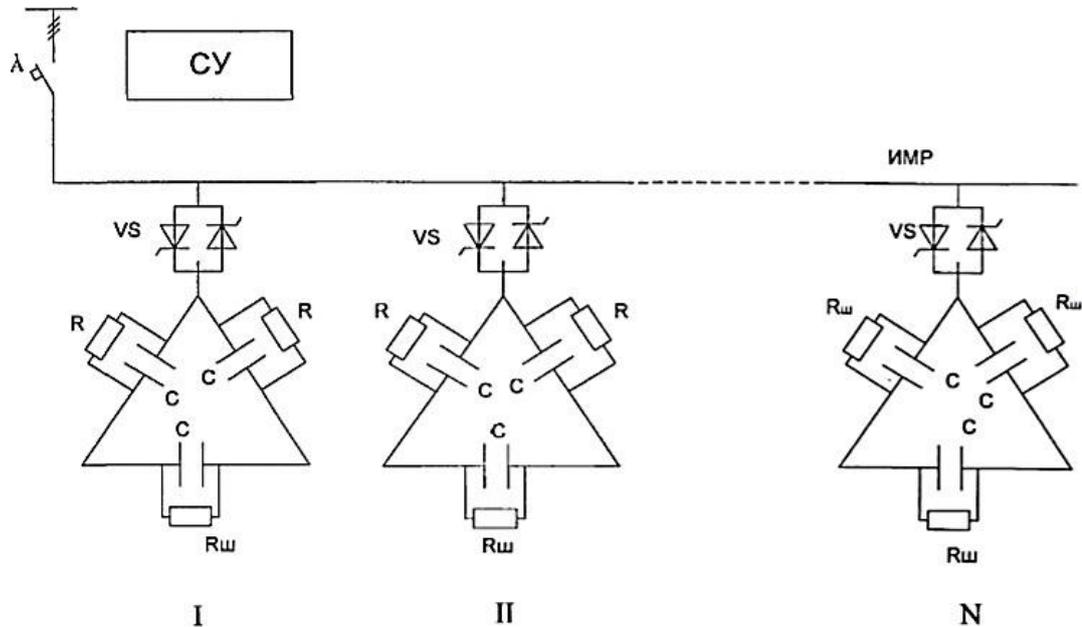


Рисунок 3.6 – Схема джерела реактивної потужності зі ступінчастим регулюванням

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 тиристири допускають тільки певне значення швидкості наростання струму [44].

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

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

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 поступово. Для плавного регулювання потужності використовують пристрої компенсації, в яких нерегульована конденсаторна батарея включена паралельно з реактором (рисунок 3.7).

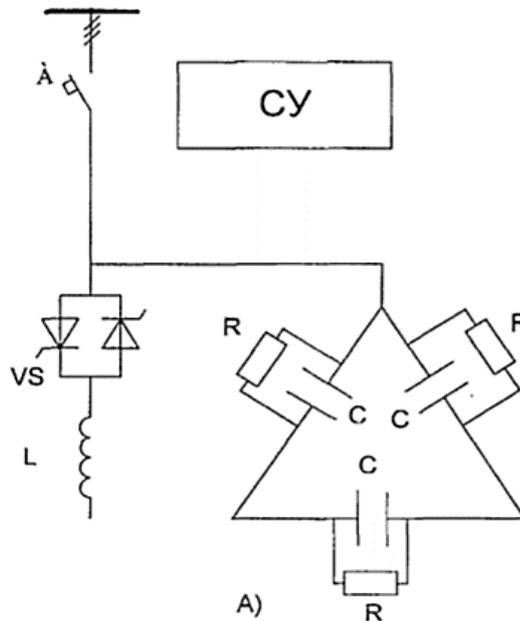


Рисунок 3.7 – Схема СТК з регульованою індуктивністю (тиристорно-реакторна група)

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).

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

$$Q_{пк} = Q_L - Q_C,$$

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

Q_L – реактивна індуктивна потужність;

Q_C – реактивна ємнісна потужність.

На рисунку 3.8 приведена одна зі схем, де паралельно включені реактори конденсаторна батарея із ступінчастим регулюванням ємностей.

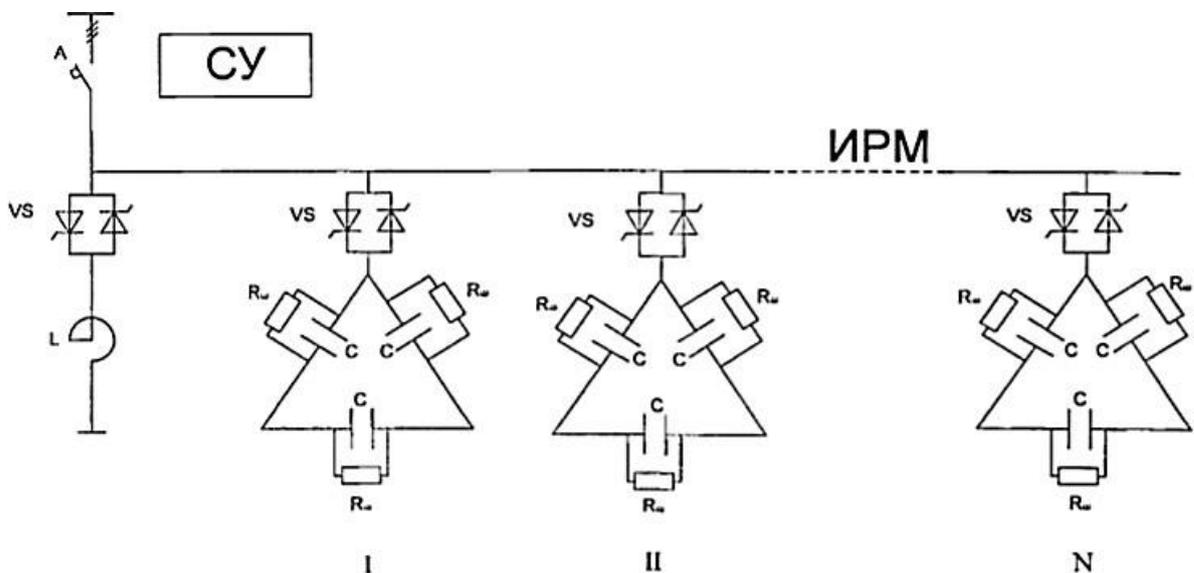


Рисунок 3.8 – Схема СТК з регульованою індуктивністю та ємністю(ступінчастою)

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:

$$Q_L = \frac{Q_{KV \max}}{2N}.$$

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 ГОСТ 13109- 97.

Так як ємності фільтр-компенсуючого пристрою одночасно ще 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 швидко і навантаження неоднакові по фазах, то такі джерела реактивної потужності виконуються окремо на кожен фазу і є швидкодіючими.

3.3 Система управління вентилями перетворювачами в схемі регульованого джерела реактивної потужності

Цифрова система управління (ЦСУ) 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 управління вентилювальним перетворювачем, по суті, виробляє в цифровій формі код фази керуючих імпульсів тиристорів і потім перетворює його в фазу керуючих імпульсів.

На рисунку 3.9 зображено структурну схему цифрової системи управління вентилювального перетворювача.

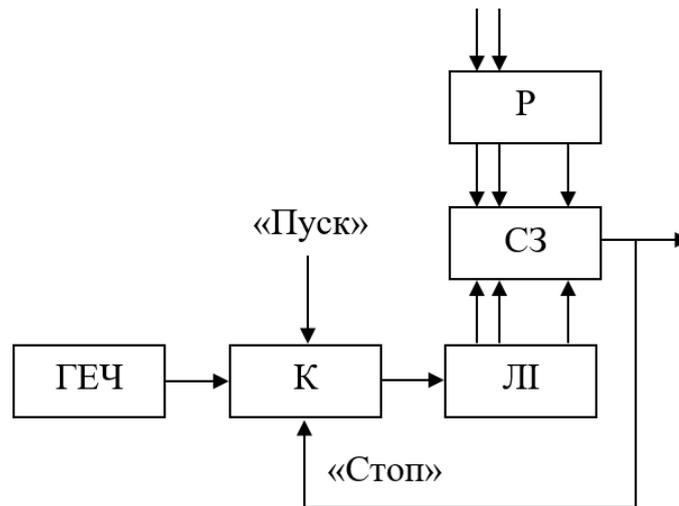


Рисунок 3.9 - Структурна схема перетворювача цифровий код - фаза

Цифровий код фази керуючих імпульсів (код кута управління α), що надходить запам'ятовуючого пристрою, записується в регістр (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). Значить, сигнал «Пуск» повинен бути синхронізований з мережею живлення.

Число імпульсів в лічильнику (ЛІ) рахується в тому ж коді, в якому представлена цифра в регістрі (Р). У разі рівності числа імпульсів в лічильнику з числом імпульсів в регістрі 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 СУ будуються на основі вертикального принципу управління. Цей спосіб управління лежить в основі сучасних цифрових фазозсувних пристроїв (ФЗП).

У цифрових СУ відбувається обробка сигналів, заданих не у вигляді напружень чи струмів, 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 управління (рисунок 3.10), що складається з двох різних систем управління.

Цифрова система дозволяє по черзі підключати три ступені конденсаторної установки (С1, С2 і С3), 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 управління. Дані імпульси надходять на керуючі електроди тиристорів VS1.

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

ЦСУ дозволяє змінити кут відкриття тиристора VS2 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 управління 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 ЦСУ зазвичай використовується лінійна форма опорного сигналу, який 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 .

Перетворення 2-х розрядного коду управління в 4-х розрядний представлено в таблиці 3.1.

Таким чином, отримані 4 ступені регулювання (відповідають куту відкриття тиристора VS2) від -25 кВАр до 0 кВАр при відсутності підключення конденсаторної установки; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї конденсаторної установки (C1); від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох конденсаторних установок (C1, C2); від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок (C1, C2 і C3), (рис. 3.11).

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

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

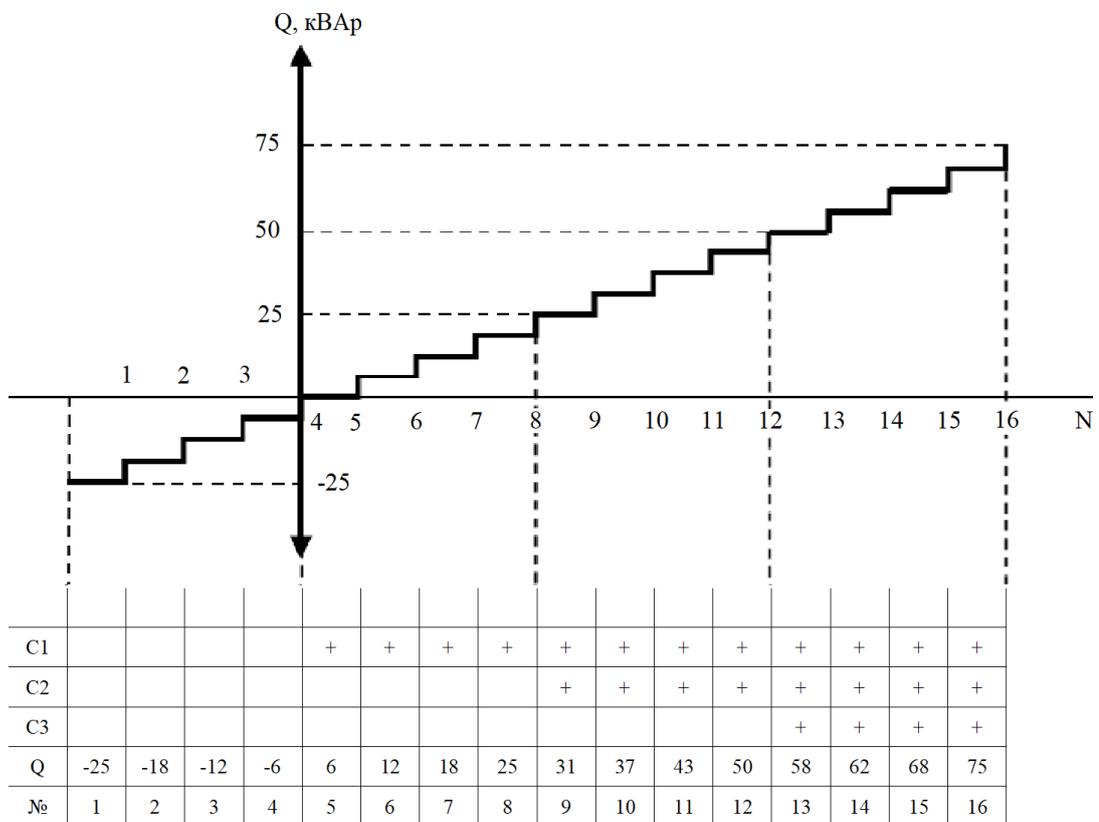


Рисунок 3.11 – Залежність значень потужності джерела реактивної потужності від числа ступенів регулювання

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 0кВАр при відсутності конденсаторної установки; від 0 кВАр до 25 кВАр при підключенні однієї конденсаторної установки (C1); від 25 кВАр до 50 кВАр при підключенні двох конденсаторних установок (C1, C2); від 50 кВАр до 75 кВАр при підключенні трьох конденсаторних установок (C1, C2 і C3).

Модель цифрової системи управління з використанням програмного комплексу NI Multisim 10, що забезпечує автоматичне регулювання реактивної потужності. Обрано варіант схеми з високою надійністю цифрових пристроїв, не вимагає налагодження. Похибки, викликані нестабільністю елементів, в запропонованій системі управління відсутні [38].

3.4 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.

У зв'язку з цим останнім часом гостро стоїть питання підвищення якості електроенергії, оскільки воно 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, тобто від одного трансформатора живиться не одна піч, а група печей (секція). Це викликає вимогу безперервної роботи трансформатора при періодичній роботі печей. Знаходження печей графітації під струмом триває 20-70 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.

Електричну мережу, яка пов'язує трансформатор з піччю графітації, називають короткою мережею печі графітації [45].

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 [46].

По коротких мережах електропечей протікають великі струми і характеризуються великою масою провідників та складністю конфігурації, причому їх експлуатація протікає в 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 [45].

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, отриману з живлячої мережі, використовувати з високим коефіцієнтом корисної дії та високим коефіцієнтом потужності.

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 [46]. 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 [6].

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.

Правильна компенсація реактивної потужності дає ряд переваг, таких як:

- вивільнення додаткової потужності трансформаторів за рахунок зниження реактивної і, як наслідок, повної потужності;
- зменшення втрат активною складовою струму (за рахунок зменшення фазних струмів в мережах споживача);
- використання меншого перерізу кабелів;
- збільшення термінів служби електроустаткування за рахунок зниження навантажень і нагріву;
- економія при оплаті за електроенергію;
- поліпшення якості електроенергії;
- 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.

ВИСНОВКИ

Основними результатами кваліфікаційної магістерської роботи є наступне:

1. На основі аналізу енергоспоживання підприємства ПрАТ «Укрграфіт» виявлено, що найбільшу частку електроенергії споживають печі графітації (73,6% від загального споживання електроенергії на підприємстві).

2. Проаналізовано електропостачання печей графітації та виявлено, що коротка електрична мережа печі володіє незначним активним, але великим реактивним опором. Внаслідок цього високий реактивний опір короткої мережі призводить до великого спаду напруги між трансформатором і піччю, а також до завантаження мережі реактивною потужністю.

3. Проаналізовано способи і засоби компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств. Для системи електропостачання печей графітації, обрано схему з регульованим джерелом реактивної потужності

4. Запропонована цифрова система управління, що дозволить виконати оптимальне регулювання реактивної потужності в системі електропостачання печей графітації.

Розрахунок економічної ефективності регульованого пристрою компенсації реактивної потужності показав, що запропонований захід з підвищення ефективності споживання електроенергії є ефективним. Втрати електроенергії за рік зменшено на 22 823 МВт·год. Економічний ефект від впровадження заходів становить 17,2 мільйонів грн. Термін окупності капітальних вкладень становить 16 місяців.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Про компанію [Електронний ресурс] / Український графіт. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://ukrgrafit.zp.ua/company> – 02.09.2019 р. – Загол. з екрану.
- 2 Продукція [Електронний ресурс] / Український графіт. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://ukrgrafit.zp.ua/produkcija> – 10.09.2019 р. – Загол. з екрану.
- 3 Економіка підприємства [Текст] : Навчальний посібник / В. С. Рижиков, В. А. Панков, В. В. Ровенська, Є. О. Підгора. – Київ – Видавничий дім «Слово», 2004. – 253 с.
- 4 Гринчуцький, В. І. Економіка підприємства [Текст] : Навчальний посібник / В. І. Гринчуцький. – Київ : Видавництво "Центр навчальної літератури", 2012. – 302 с.
- 5 Чалых, Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий [Текст] : учеб. / Е. Ф. Чалых. – Москва : Издательство «Металлургия», 1972. – 432 с.
- 6 Чалых, Е. Ф. Производство электродов [Текст] : учеб. пособие / Е. Ф. Чалых. – Москва : Metallurgizdat, 1954. – 328 с.
- 7 Шулепов, С. В. Физика углеграфитовых материалов [Текст] : учеб. / С.В. Шулепов. — Москва : Metallurgija, 1972. — 256 с.
- 8 Данцис, Я. Б. Электротермические процессы в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / Я. Б. Данцис, В. А. Ершов, Г. М. Жиллов ; под общ. ред. В. А. Ершова ; — Москва : Химия, 1984. — 464 с.
- 9 Сюняев, З. И. Производство, обогащение и применение нефтяного кокса [Текст] : / З.И. Сюняев. — М. : Химия, 1973. — 296 с.
- 10 Чалых, Е. Ф. Печи электродных заводов [Текст] : учеб. пособие / Е. Ф. Чалых, Л. Ф. Пащенкова – Москва : МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1983. – 76 с.

- 11 Чалых, Е. Ф. Обжиг электродов [Текст] : учеб. / Е. Ф. Чалых. – Москва: Металлургия, 1981. – 116 с.
- 12 Чалых, Е. Ф. Справочник по углеграфитовым материалам [Текст] : учеб. / Е. Ф. Чалых, М. И. Рогайлин. – Ленинград : Химия, 1974. – 208 с.
- 13 Гасик, М. И. Электроды рудовосстановительных электропечей [Текст] : учеб. / М. И. Гасик. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1984. – 248 с.
- 14 Хасанов, О. Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий [Текст] : учеб. / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 212 с.
- 15 Санников, А. К. Принцип управления формирования структуры и свойств графитированных электродов [Текст] / А. К. Санников // Цветные металлы, 1990. – №9. – с. 58-61.
- 16 Капелянов, В. Я. Об оптимизации температуры смешивания компонентов электродных и анодных масс [Текст] / В. Я. Капелянов // Цветные металлы. – 1990. – №7. – с. 75.
- 17 Полисар, Э. П. Формирование упругих свойств графита в процессе прессования [Текст] / Э. П. Полисар, В. П. Савченко, В. Я. Котосонова // Цветные металлы. – 1983. – № 6. – с. 59-61.
- 18 Карзунова, Р. В. Влияние способа прессования на свойства графита [Текст] / Р. В. Карзунова // Цветные металлы. – 1973. – № 5. – с. 71-80.
- 19 Карзунова, Р. В. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции [Текст] / Р. В. Карзунова // Цветные металлы.– 1973. – № 5. – с. 80-91.
- 20 Островский, Ю. С. Искусственный графит [Текст] / В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Костиков. – Москва : Металлургия, 1986. – 272 с.

21 Степаненко, М. А. Исследование обжига заготовок в многокамерных печах [Текст] / М. А. Степаненко, Е. М. Солдатенко, Н. И. Матусяк // Кокс и химия. – 1958. – № 2. – с. 22-27

22 Фокин, В. П. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов [Текст] / В. П. Фокин, А. А. Малахов, С. А. Малахов // Цветные металлы. – 2002. – № 4. – с. 48-51.

23 Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов [Текст] : учеб. пособие / Е. Ф. Чалых. – Москва : Металлургия, 1990. – 238 с.

24 Экономия электроэнергии на предприятии, энергосбережение [Электронный ресурс] / ЭнергоПрофи. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://energyprofy.ru/content/articles/100/375/> – 20.10.2019 р. – Загол. з екрану.

25 Мозолевич, Г. Я. Енергоаудит та енергоменеджмент в проектах сталого розвитку [Текст] : методичний посібник / Г. Я. Мозолевич, І. О. Гордєєва, Н. В. Бібік. – Дніпро : Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2016. – 62 с.

26 Енергетичний аудит [Електронний ресурс] / Вища рада енергоаудиторів та енергоменеджерів України. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://ukrenergoaudit.org/ua/diyalnist/energoaudit.html> – 20.05.2018 р. – Заголовок з екрану.

27 Тарифи на розподіл [Електронний ресурс] / ПАТ Запоріжжяобленерго. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.zoe.com.ua/тарифи-на-розподіл/> – 24.11.2019 р. – Загол. з екрану.

28 ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 1999-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1997. – 36 с.

29 Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] : учеб. / Б. И. Кудрин – Москва : Интер Инжиниринг, 2006. – 672 с.

30 Иванов, В. С. Режимы потребления и качества электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] : учеб. / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

31 Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] : учеб. / А. А. Федоров – Москва : Энергия, 1979. – 408 с.

32 Электрическая часть станций и подстанций [Текст] : учеб. / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова, М. Н. Околович. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

33 Веников, В. А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах [Текст] : учеб. / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

34 Ермилов, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] : учеб. / А. А. Ермилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

35 Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] : учеб. / Б. И. Кудрин. – 2-е изд. – Москва : Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

36 Глитерник, С. Р. Тиристорные преобразователи со статическими компенсирующими устройствами [Текст] : учеб. / С. Р. Глитерник. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.

37 Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышения качества электроэнергии [Текст] : учеб. / Ю. С. Железко. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

38 Конюхова, Е. А. Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанного выбора режима напряжения и компенсации реактивной мощности [Текст] : дис. ... д. тех. наук – Москва : МЭИ, 1998. – 455 с.

39 Ильяшов, В. П. Комплектные конденсаторные установки [Текст] : книга / В. П. Ильяшов. – М. : Энергия, 1968. – 88 с.

40 Матура, Р. М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности [Текст] : пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.

41 Конюхова, Е. А. Определение мощности конденсаторных батарей в сети промпредприятия [Текст] : учеб. пособие / Е. А. Конюхова. – Москва : Промышленная энергетика, 1979. – 311 с

42 Пекне, В. З. Синхронные компенсаторы (конструкция, монтаж, питание и эксплуатация) [Текст] : учеб. / В. З. Пекне. – Москва : Энергия, 1980. – 372 с.

43 Карташова, И. И. Статические компенсаторы реактивной мощности в энергосистемах [Текст] : учеб. / И. И. Карташов, В. И. Чехов. – Москва : Издательство МЭИ, 1990. – 184 с

44 Абрамович, М. И. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках [Текст] : учеб. / М. И. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либер и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.

45 Смелянский, М. Я. Короткие сети электрических печей [Текст] : книга / М. Я. Смелянский, Н. И. Бортничук. – Москва : Госэнергоиздат, 1962. – 96 с.

46 Струнский, Б. М. Короткие сети электрических печей [Текст] : книга / Б. М. Струнский. – М. : Металлургиздат, 1962. – 335 с.

47 Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці [Текст] : підручник / В. Ц. Жидецький. – Львів : Афіша, 2002. – 320 с.

48 Канарев, Ф. М. Охрана труда [Текст] : книга / Ф. М. Канарев – М. : Агропромиздат, 1988. – 350 с.

Додаток А

Демонстраційні матеріали до магістерської роботи
Підвищення енергоефективності ПрАТ «Укрграфіт»