

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
Кафедра електричної інженерії

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «**РОЗРОБКА МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ  
КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В  
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ**»

Виконав: студент VI курсу, групи ЕТм-61,  
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Прокопчук Віктор Григорович

(прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

**Міністерство освіти і науки України**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Центр перепідготовки та післядипломної освіти

Кафедра Електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень - магістр

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

Електричної інженерії

**д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.**

“14” листопада 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Прокопчуку Віктору Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка методів і алгоритмів управління компенсацією реактивної потужності в системах електропостачання підприємств»

керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 10.11.2023 р. № 4/7-1040

2. Строк подання студентом роботи - грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Технічний паспорт виробничого цеху ТОВ «СБ Борднетце –Україна». Статистичні дані про електричне навантаження та споживання виробничого цеху підприємства, схема електрична принципова силової частини та системи електропостачання.

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставлені задачі та шляхи їх розв'язку

2. Математична модель системи управління ПКРП

3. Схема визначення амплітуди синусоїдального сигналу

4. Схема виміральної частини системи керування потужністю конденсаторних батарей

5. Графіки результатів дослідження математичної моделі системи управління

6. Блок-схема алгоритму керування потужністю батарей статичних конденсаторів при несиметричному навантаженні

7. Загальні висновки до кваліфікаційної роботи

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Гурик О.Я., к.т.н., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання - листопад 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналітичний розділ</i>		
2	<i>Проектно-конструкторський розділ</i>		
3	<i>Розрахунково-дослідницький розділ</i>		
4	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>		
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>		
6	<i>Оформлення графічної частини</i>		

Студент

( підпис )

Прокопчук Р. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

( підпис )

Оробчук Б. Я.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Прокопчук В.Г. Розробка методів і алгоритмів управління компенсацією реактивної потужності в системах електропостачання підприємств. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2023.

Стор. - 67; рис. - 23; табл. - 4; плакатів - 7; джерел – 33, додатків - 1

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання розробка методів і алгоритмів управління компенсацією реактивної потужності в системах електропостачання підприємств.

Метою виконаної роботи є підвищення ефективності функціонування системи електропостачання промислових підприємств шляхом використання пристроїв компенсації реактивної потужності з метою зменшення втрат потужності та оптимізації режиму напруги.

Для досягнення мети було розроблено метод та алгоритм управління джерелами реактивної потужності у системі електричного постачання промислових підприємств при виникненні асиметрії між фазами, розроблено методику проектування регулятора струму збудження синхронного компенсатора із впровадженням сучасних технологій та розроблено методи та алгоритми оптимального управління компенсацією реактивної потужності в системах електричного постачання підприємств.

**Ключові слова:** компенсація реактивної потужності, система електропостачання, коефіцієнта потужності електричної мережі, система управління конденсаторними, моделювання вимірювальної частини конденсаторного пристрою.

## ABSTRACT

V. Prokopchuk. Development of methods and algorithms for controlling reactive power compensation in power supply systems of enterprises. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group ETm-61. – Ternopil: TNTU, 2023.

Page – 67; Illustrations – 23; Tables – 4; Blueprints – 7; Sources – 33, Applications – 1.

The qualification work deals with the development of methods and algorithms for managing the compensation of reactive power in the power supply systems of enterprises.

The purpose of the performed work is to increase the efficiency of the operation of the power supply system of industrial enterprises by using reactive power compensation devices in order to reduce power losses and optimize the voltage regime.

To achieve the goal, a method and algorithm for managing reactive power sources in the electrical supply system of industrial enterprises in the event of an asymmetry between phases was developed, a methodology for designing a synchronous compensator excitation current regulator with the introduction of modern technologies was developed, and optimal methods and algorithms were developed management of reactive power compensation in the electrical supply systems of enterprises.

**Key words:** reactive power compensation, power supply system, power factor of the electric network, capacitor control system, modeling of the measuring part of the capacitor device.

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1 Аналіз і класифікація втрат у системі електропостачання	11
1.2 Аналіз втрат в знижувальних трансформаторах	12
1.3 Аналіз втрат в кабельних лініях і мережах низької напруги	13
1.4 Вплив коефіцієнта потужності електричної мережі на втрати у системі електропостачання	14
1.5 Аналіз втрат в системі електропостачання промислових підприємств та способи їх зменшення	17
1.6 Аналіз технічних засобів компенсації реактивної потужності	21
1.7 Вплив компенсації реактивної потужності на систему електропостачання	24
1.8 Висновок до розділу 1	28
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	29
2.1 Дослідження систем управління конденсаторними установками компенсації реактивної потужності	29
2.2 Дослідження вектора напруги на шинах вузла навантаження	30
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	39
3.1 Розробка моделі давача асиметрії для системи управління ПКРП	39
3.2 Моделювання вимірювальної частини конденсаторного ПКРП	42
3.3 Алгоритм керування потужністю конденсаторної установки при несиметричному навантаженні	44
3.4 Висновок до розділу 3	51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	53
4.1 Заходи безпеки при експлуатації пристроїв компенсації реактивної потужності	53
4.2 Захист персоналу у діючих електроустановках	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61
Додаток А. Диференціальні рівняння синхронного компенсатора	65

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Виробництво електричної енергії здійснюється в рамках Єдиної Енергетичної Системи, а також автономними електростанціями, що використовують генерацію енергії вітру, сонця, води, хімічну енергію перетворення попутного газу, нафти та інших вуглеводнів. Якість виробленої електричної енергії повинна відповідати вимогам державних стандартів, де допустиме значення відхилення становить не більше  $\pm 1\%$  від номінального значення напруги, а допустиме значення відхилення частоти становить трохи більше  $\pm 0,5\%$  від номінального значення частоти [1].

Відхилення параметрів електричної енергії від нормативних величин може бути пов'язане з порушенням установлених режимів або значень балансів активної та реактивної потужності. Результатом невідповідності балансу генерованої та споживаної активної потужності є зміна частоти електроенергії. Також результатом невідповідності балансу генерованої та споживаної реактивної потужності є зміна напруги. Наприклад, для асинхронних двигунів зниження значення напруги на 12-15% від номінального значення зменшує електромагнітний момент на 73-75%, а зниження частоти на 5% може викликати зниження реактивного опір та збільшення статорного струму, що призводить до додаткового нагрівання асинхронного двигуна.

Зниження значення активної складової струму в лінії електропередачі зазвичай пов'язане з оптимальним вибором установленої потужності асинхронних двигунів при дотриманні їх ефективності роботи та заданої продуктивності.

Зниження величини реактивної складової у більшості випадків пов'язане із компенсацією реактивної потужності навантаження.

Методи і задачі компенсації реактивної потужності навантаження споживачів завжди розглядалася у вигляді зниження втрат потужності в електричних мережах. У цьому випадку економічне стимулювання встановлення компенсуючих установок у системах електричного постачання

промислових підприємств зазвичай здійснювалося із застосуванням знижок та надбавок до тарифів на активну електричну енергію [2].

Варто відзначити, що компенсація реактивної потужності є прямим шляхом до зменшення втрат у системі електричного постачання великих та малих промислових підприємств і її в значній мірі можна віднести до класу енергозберігаючих технологій. В більшості випадків на промислових підприємствах якість електричної енергії не відповідає вимогам державних стандартів. Підвищена споживана з мережі реактивна потужність і зниження якості напруги тягне за собою додаткові витрати на оплату електроенергії та ремонт несправного технологічного обладнання [3].

Для зменшення втрат та покращення використання електроенергії в умовах обмежень на максимальну споживану потужність, значну роль надається сучасним технічним засобам та системам управління з метою покращення енергетичних характеристик, зокрема підвищення коефіцієнта потужності мережі до необхідних значень та зменшення складових гармонік у напрузі мережі. Підвищення коефіцієнта потужності зумовлює зменшення споживання з мережі активної та реактивної енергії, відповідно, збільшує термін служби обладнання внаслідок розвантаження за потужністю.

Останніми роками спостерігається невідповідність між отриманим рівнем теорії та передовими завданнями розвитку теорії джерел реактивної потужності (ДРП).

**Мета і завдання досліджень.** Метою цієї кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування системи електропостачання промислових підприємств шляхом використання пристроїв компенсації реактивної потужності з метою зменшення втрат потужності та оптимізації режиму напруги.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- розроблено метод та алгоритм управління ДРП у системі електричного постачання промислових підприємств при виникненні асиметрії між фазами;
- розроблено методику проектування регулятора струму збудження синхронного компенсатора із впровадженням сучасних технологій;



- розроблено методи та алгоритми оптимального управління компенсацією реактивної потужності в системах електричного постачання підприємств.

Зазначені вище проблеми носять комплексний характер. Поки що їх системний розв'язок не отримав сьогодні розвитку у зв'язку з недостатньою теоретичною розробкою питань управління. Але ефективне впровадження мікропроцесорної техніки забезпечує розробку складних і достатньо ефективних та надійних засобів регулювання, а мікропроцесорне управління ДРП дозволяє значно ширше застосовувати для управління складні розширені логічні закони управління з метою зниження втрат в лінії передач. Впровадження системного підходу до розробки новітніх ДРП вимагає розвитку загального підходу проектування ДРП, створення сучасних елементів технологічного процесу виробництва та споживання електроенергії невизначеними об'єктами.

З урахуванням вище викладеного задача створення та модернізації існуючих ДРП на базі новітніх технологій та елементної бази для зниження втрат при передачі електричної енергії *є актуальною*.

**Об'єктом дослідження** є режим роботи системи електропостачання виробничого цеху промислового підприємства.

**Предметом дослідження** є оптимізаційні методи і моделі вибору місць встановлення компенсуючих пристроїв та процеси їх впровадження і використання в системі електропостачання промислового підприємства.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

полягає в запропонованій методиці визначення потужності і місця встановлення конденсаторів, розроблених заходах комплексного підходу до вирішення задачі компенсації реактивної потужності з використанням наявних засобів та методів регулювання.

**Практичне значення одержаних результатів роботи:**

У кваліфікаційній роботі отримано наукові результати, які мають практичне значення щодо підвищення ефективності функціонування системи електропостачання промислових підприємств, в обґрунтуванні раціонального

застосування пристроїв компенсації реактивної потужності в реальній системі електропостачання виробничого цеху підприємства, внаслідок чого отримано зниження втрат і забезпечення норм якості електроенергії.

### **Апробація результатів кваліфікаційної роботи.**

Основні положення роботи і її результати доповідалися на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 6-7 грудня 2023 р. (м. Тернопіль).

### **Публікації.**

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Методи зниження втрат електричної енергії в розподільчих мережах». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2023.

### **Структура роботи.**

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (33 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 67 сторінки, 3 таблиці, 23 рисунки, 1 додаток.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Аналіз і класифікація втрат у системі електропостачання

Розглядаючи промислове підприємство у якості великої технічної та організаційної системи, можна виділити його слід виділити його електричну господарство як окрему підсистему. Варто відзначити, що електричне господарство є доволі великою і складною ієрархічною системою, зокрема з системою електропостачання, силовим електрообладнання та автоматизацією, електричним освітленням, експлуатацією та ремонтом електричного обладнання. У всіх елементах системи електричного постачання промислових підприємств мають місце втрати електроенергії, що пов'язано з її передачею, а також постійним збільшенням та ускладненням електрообладнання [4].

Фактичні втрати  $\Delta Q$  у системі електропостачання визначають у вигляді різниці між відпущеною електроенергією з шин електричних станцій  $W_{в.с.}$  та сумою оплаченої споживачами електроенергії  $W_{о.с.}$  і витраченої на виробничі потреби енергосистемою  $W_{в.п.}$ :

$$\Delta W = W_{в.с.} - (W_{о.с.} + W_{в.п.}) \quad (1.1)$$

Величина фактичних складається з технічних втрати  $\Delta W_T$  і комерційних втрат  $\Delta W_K$ . Технічні втрати поділяються на навантажувальні втрати  $\Delta W_n$ , втрати холостого ходу  $\Delta W_{х.х.}$ , втрати на корону  $\Delta W_{кор.}$  у лініях електропередачі та джоулеві втрати  $\Delta W_d$  у кабельних лініях. Структуру витрат електроенергії приведено на рис.1.1, а їх класифікація здійснюється за групами елементів мереж.

В електричних мережах напругою 0,4-20 кВ розподіляється близько 40% всієї виробленої електричної енергії, тому правильний підхід до побудови системи розподілу енергії для забезпечення високої надійності систем електропостачання і зменшення втрат в електричних мережах, має дуже важливе значення [5].



Рисунок 1.1 - Структура витрати електричної енергії на її передавання

До втрат у мережах низької напруги відносяться наступні втрати [6]:

- втрати в понижувальних трансформаторах;
- втрати в кабельних лініях на джоулеве тепло;
- втрати у вимірювальних трансформаторах струму та трансформаторах напруги разом з лічильниками електроенергії;
- витрати електроенергії на власні потреби підстанцій.

## 1.2 Аналіз втрат в знижувальних трансформаторах

При перетворенні напруги у трансформаторних підстанціях спостерігаються значні втрати електричної енергії, які можна компенсувати за рахунок збільшення потужності джерел живлення.

Втрати електричної енергії в знижувальних трансформаторах поділяються на втрати в обмотках (теплові втрати) та втрати в осерді. Величина втрат у трансформаторах залежить від значення коефіцієнта навантаження трансформатора, який можна визначити за формулою:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{ном}} \approx \frac{P_{нав.}}{P_{ном.тр.}} \quad (1.2)$$

Втрати у трансформаторі визначаються згідно його коефіцієнта корисної дії. Відповідно до [7] коефіцієнта корисної дії трансформатора можна визначити за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{P_{x.x.} + \beta^2 P_{k.z.}}{\beta \cdot P_{ном} \cdot \cos\varphi_2 - P_{x.x.} + \beta^2 P_{k.z.}}, \quad (1.3)$$

де  $P_{x.x.}$  та  $P_{k.z.}$  – втрати холостого ходу та короткого замикання трансформатора;

$P_{ном}$  – значення номінальної потужності трансформатора;

$\beta$  – значення коефіцієнта навантаження трансформатора.

У навчальному посібнику [8] наведені точніші методи розрахунку коефіцієнта корисної дії трансформатора, але отримані результати демонструють незначну їх відмінність (в межах 0,3%) від значень, які можна отримати за формулою (1.3).

Крім миттєвого значення втрат також користуються поняттям річних та добових відносних втрат електричної енергії, які рівні відношенню втрат електричної енергії за добу (або за рік) до величини споживаної з мережі електричної енергії. Розмір дійсних сумарних втрат у понижуючих трансформаторах може становити біля 8 % електричної енергії, яка споживається з мережі [7].

### 1.3 Аналіз втрат в кабельних лініях і мережах низької напруги

Силові кабелі використовуються для передачі та розподілу електричної енергії, а побудова та експлуатація кабельних ліній виходить завжди дорожчою за повітряні лінії.

До втрат у кабельних лініях, які необхідно враховувати при розрахунках, належать зазвичай теплові втрати. Похибки визначення втрат у кабельних лініях обумовлені неточними даними щодо довжин ліній, старінням кабелю і іншими причинами. З метою уточнення дійсних параметрів ліній варто проводити дослідження холостого ходу та короткого замикання під час виведення ліній на ремонт.

При виконанні розрахунку допустимого навантаження зазвичай враховують всі джерела тепла, що можуть виникати у кабелі під час його роботи, а також теплові на кабель з боку навколишнього середовища.

Відомо, що втрати електричної енергії в мережах низької напруги при постійно заданих параметрах лінії, схеми живлення та переданої потужності, змінюються в залежності від розподілу навантаження по всіх фазах. Несиметрія напруги та струмів може викликати додаткові втрати потужності та електричної енергії в мережі, скорочення термінів служби електричного обладнання, провідників та трансформаторів, а також перевантаження деяких фаз.

Для оцінки рівня асиметрії напруги використовують поняття коефіцієнта несиметрії напруги [9]:

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{л.ном}} \quad (1.4)$$

де  $U_2$  - напруга зворотної послідовності;

$U_{л.ном}$  - номінальна лінійна напруга.

Відповідно до нормативних вимог, наведених у [10], коефіцієнт несиметрії напруги повинен мати значення більше 2%. Зазвичай при наближенні до шин трансформаторної підстанції асиметрія різко знижується. При проектуванні трансформаторних підстанцій асиметрію враховують шляхом відповідного збільшення нормованих електричних навантажень, тобто проводять розрахунок найбільш навантаженої фази [11].

#### **1.4 Вплив коефіцієнта потужності електричної мережі на втрати у системі електропостачання**

Більшість електроприймачів на промислових підприємствах споживає крім активної потужності також і реактивну потужність. Параметром споживання активної потужності є коефіцієнт потужності мережі -  $\cos\varphi$ . Підвищуючи  $\cos\varphi$ , можна зменшити споживання з мережі активної енергії та збільшити термін служби обладнання за рахунок розвантаження потужності [12].

На рис.1.2 приведено діаграму відносного значення повної потужності, яка споживається з мережі, в залежності від значення  $\cos\varphi$ .

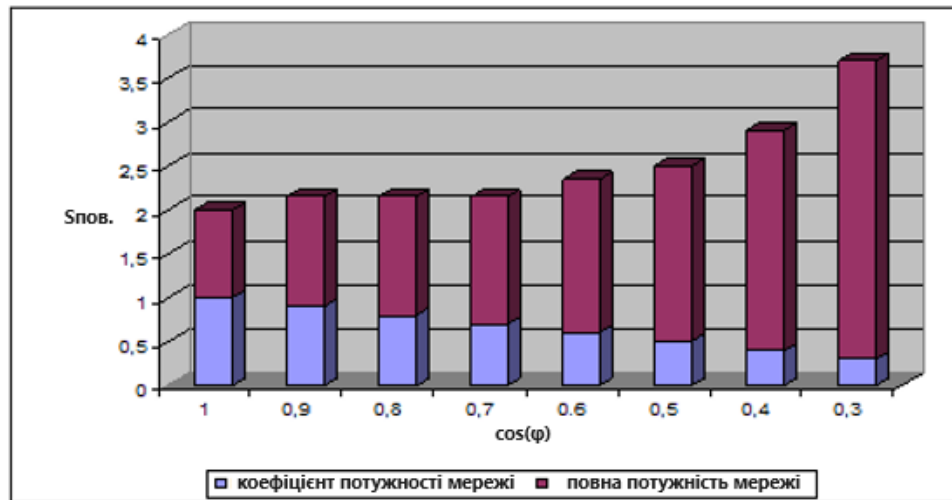


Рисунок 1.2 - Відносне значення споживаної з мережі повної потужності в залежності від  $\cos\varphi$

На рис.1.3 приведено діаграму відносного значення реактивної потужності, яка споживається з мережі, в залежності від значення  $\cos\varphi$ .

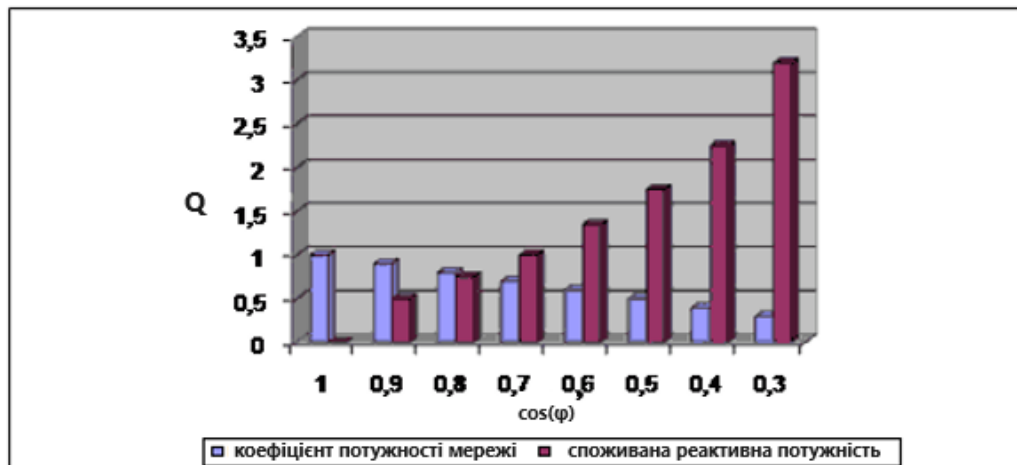


Рисунок 1.3 - Відносне значення споживаної з мережі реактивної потужності в залежності від  $\cos\varphi$

У приведених вище діаграмах за одиницю вимірювання прийнято значення активної потужності.

На рис.1.4 приведено діаграму відносного значення міжфазного струму, що протікає фазами в залежності від значення коефіцієнта потужності.

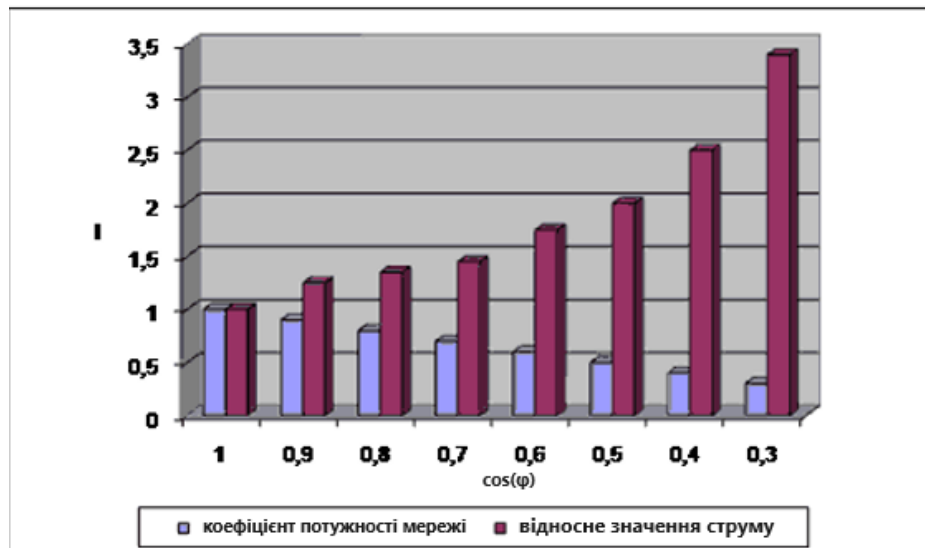


Рисунок 1.4 - Відносне значення міжфазного струму в залежності від  $\cos\varphi$

У наведеному графіку за одиницю вимірювання приймаємо значення струму тільки при активному навантаженні. У відносних величинах цей графік чисельно є подібним до графіка повної потужності.

На рис. 1.5 приведено діаграму відносних активних втрат у проводах в залежності від значення  $\cos\varphi$ .

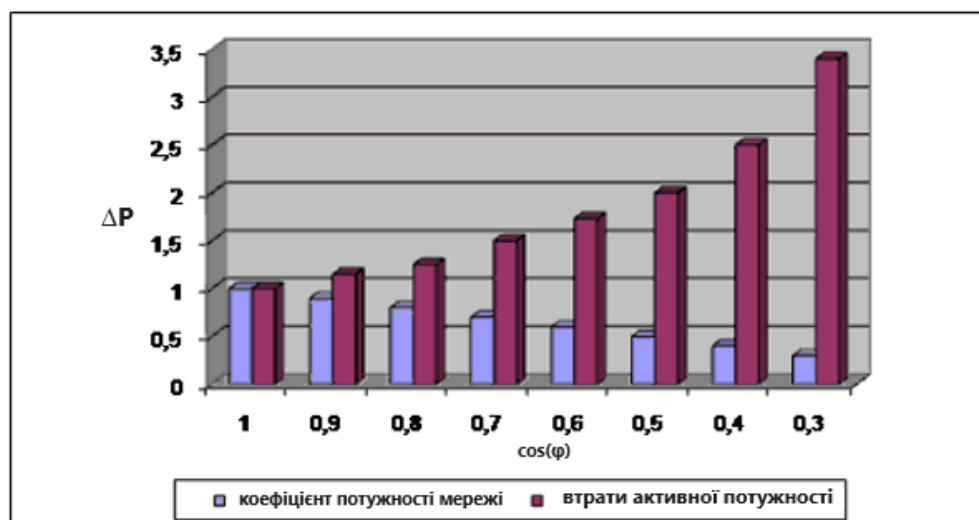


Рисунок 1.5 - Відносні активних втрати в проводах в залежності від  $\cos\varphi$

Значення втрат в проводах і шинах є пропорційними квадрату протікаючого через них струму. З приведених вище графіків (рис.1.2-1.5) можна побачити, що при  $\cos\varphi = 0,7$  спостерігається подвійна втрата у лініях.



При цьому слід зазначити, що термін служби більшої частини силових трансформаторів, що експлуатуються на українських промислових підприємствах, становить більше 20-и років. Для продовження кінцевого терміну служби виникає потреба в розвантаженні трансформаторів по струму, що дозволить зменшити значення температури перегріву обмоток і, відповідно, зменшити швидкість старіння ізоляції. Загально відомо, що зменшення температури перегріву обмоток трансформатора на  $10^{\circ}\text{C}$  дозволяє зазвичай у два рази збільшити залишковий термін служби силових трансформаторів [13].

### 1.5 Аналіз втрат в системі електропостачання промислових підприємств та способи їх зменшення

Одним із способів зменшення втрат в системі електропостачання є використання компенсуючих пристроїв (КП), які в залежності від їх типу та режиму роботи можуть бути генераторами або споживачами реактивної потужності ( $Q_{\text{КП}}$ ), компенсуючи її дефіцит або надлишок в електричній мережі. Включення КП в будь якому місці електричної мережі дозволяє змінити реактивну складову навантаження. Внаслідок цього змінюється повна потужність  $S$  вузла навантаження відповідно до векторних діаграм, які приведені на рис.1.6.

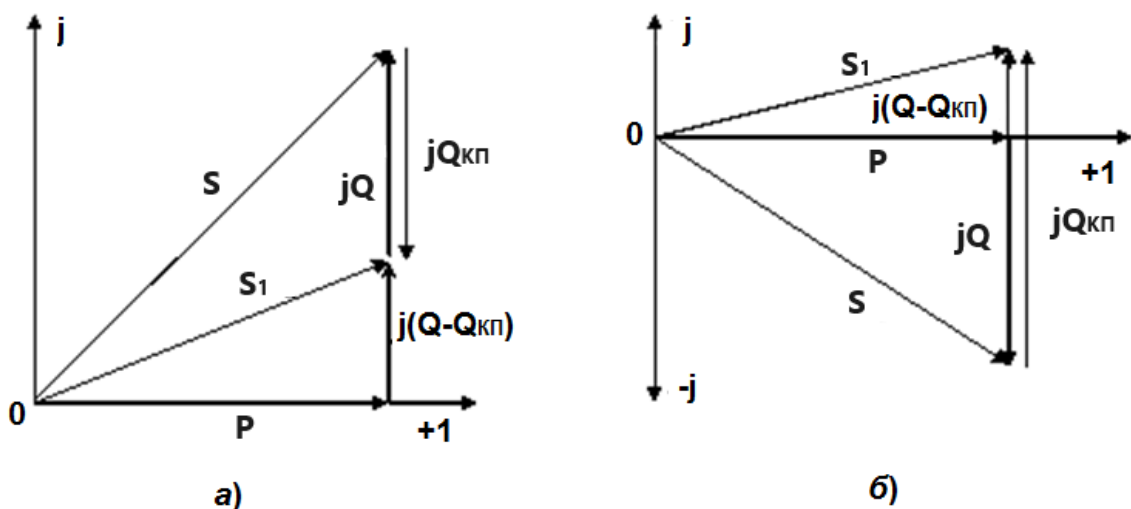


Рисунок 1.6 – Векторні діаграми компенсація дефіциту (а) та надлишку (б) реактивної потужності у вузлі мережі

Загально відомо, щ внаслідок підключення КП, які генерують реактивну потужність або споживають її, змінюється передана ділянками мережі реактивна потужність і, відповідно, втрати напруги  $\Delta U$ , які залежать від різниці згідно формули:

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_{кп}) X_d}{U}, \quad (1.5)$$

де  $P$  – активна потужність мережі;

$R$  – опір мережі;

$X_d$  - поздовжній індуктивний опір мережі.

В результаті виникає можливість регулювання напруги у вузлах системи електропостачання та на затискачах споживачів:

$$U_{i+1} = U_i \pm \Delta U \quad (1.6)$$

Знижувати значення реактивного струму у лінії передачі можна за допомогою встановлення локальних джерел реактивної потужності. У цьому випадку буде зменшуватися передача реактивної потужності ділянками мереж:

$$\Delta Q = Q - Q_{кп}, \quad (1.7)$$

а також знижуватися втрата активної потужності (краще передається активна потужність, якщо  $S = const$ ) в них:

$$\Delta P = \sqrt{S^2 - (Q - Q_{кп})^2}, \quad (1.8)$$

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P dt \quad (1.9)$$

і створюються умови передачі мережею значних потоків активної потужності.

Крім використання компенсуючих пристроїв для зниження споживання реактивної потужності приймачами застосовують наступні заходи [14].

1) Правильний підхід до вибору електричних двигунів за потужністю і типом. Потужність електричних двигунів слід вибирати у відповідності до режиму виробничого обладнання без додаткових запасів.

Асинхронний двигун працює з найкращими енергетичними показниками при завантаженні від 75 до 100% своєї номінальної потужності. За рівних умов потужності, частоти обертання та типу виконання (закритий або відкритий) асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають кращі енергетичні характеристики, ніж асинхронні двигуни із фазним ротором. У зв'язку з цим, коли застосування асинхронного двигуна з фазним ротором не обумовлено умовами пуску та роботи, доцільно застосовувати асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які мають гірші енергетичні показники, ніж двигуни відкритого або захищеного типу тієї ж потужності та частоти обертання. Для нових пристроїв для деяких випадків найбільш раціональним може бути застосування синхронних двигунів, якщо вони допускаються умовами виробництва. У цьому випадку рішення приймається на базі порівняння витрат за варіантами: при встановленні синхронного двигуна та при встановленні асинхронного двигуна тієї ж потужності разом з компенсаційним пристроєм.

2) Заміна недовантажених асинхронних двигунів менш потужними двигунами для зменшення надмірної потужності. При систематичному недозавантаженні асинхронних двигунів необхідно обов'язково збільшити навантаження електричних двигунів шляхом раціонального технологічного процесу та збільшити завантаження виробничого обладнання. Заміні підлягають асинхронні двигуни, які мають менше 60% завантаження при наявності техніко-економічного обґрунтування та можливості практичної можливості такої заміни.

3) Зменшення напруги в недостатньо завантажених двигунах. У разі неможливості заміни в недостатньо завантажених асинхронних двигунів варто відмовитися від зменшення напруги на його затискачах. Зниження підведеної до обмоток асинхронного двигуна напруги до деякого мінімального допустимого значення  $U_{min}$  може викликати зменшення споживання ним реактивної потужності внаслідок зменшення струму намагнічування для створення його електромагнітного поля. Відомі наступні методи зниження напруги у недовантажених асинхронних двигунах:

а) перемикання статорної обмотки із трикутника на зірку;

- б) секціонування статорних обмоток;
- в) зниження напруги в мережах живлення асинхронних двигунів шляхом перемикання відгалужень цехового трансформатора.

Варто відмітити, що всі вище перераховані методи зниження напруги в обмотках недостатньо завантажених електродвигунів викликають не тільки зниження їх реактивної потужності, але і зменшення втрат потужності і збільшення коефіцієнта корисної дії двигунів.

4) Використання обмежувачів холостого ходу робочих верстатів. Робота асинхронних двигунів у багатьох робочих верстатах характеризується тим, що у міжопераційні періоди вони працюють на холостому ході, тривалість роботи якого може становити більше 50% всього часу роботи. Використання обмежувачів холостого ходу має на меті скорочення непродуктивної витрати електричної енергії та усунення реактивних навантажень шляхом відключення двигунів на міжопераційний період. Установка обмежувачів холостого ходу на верстатах є економічно доцільною тільки у тих випадках, коли тривалість міжопераційного періоду може перевищувати 10 секунд. Обмежувач холостого ходу, що використовується у схемі керування електричним двигуном за допомогою магнітного пускача, виконує роль пристрою відімкнення та ввімкнення, рухома частина якого в певний момент виробничого процесу приходиться у дотик з однією із деталей верстата або перестає дотикатися до неї.

5) Підвищення якості ремонту електричних двигунів. Під час проведення ремонту електричних двигунів не рекомендується знижувати їх енергетичні параметри. Добротна якість ремонту є ознакою нормальної роботи електричних двигунів при високих енергетичних показниках. Вважається недопустимою операція обточування ротора, зменшення числа провідників у пазу, розточування пазів та випалювання обмотки. Для контролю за якістю ремонту електричних двигунів необхідно здійснювати випробування після ремонту, звертаючи основний акцент на тому, щоб струм холостого ходу після ремонту не перевищував номінальний.

б) Обмеження струму холостого ходу силових трансформаторів. При тому, що реактивна потужність на намагнічування кожного окремого трансформатора є відносно невеликою, її необхідно враховувати із-за значної кількості встановлених на підприємствах трансформаторів, більшість з яких працюють цілодобово. До заходів, які застосовуються для зниження реактивної потужності у трансформаторах, можна віднести наступні: підтримка економічного режиму їх роботи; заміна та перестановка незавантажених трансформаторів; покращення якості їх ремонту. Втрати реактивної потужності трансформатора у порівнянні з асинхронним двигуном залежать від його навантаження набагато менше і в діапазоні навантажень десь від 35 до 100% доля реактивних втрат у повних втратах потужності трансформатора змінюється не дуже суттєво. А от в діапазоні навантажень від 35% до нуля вона значно збільшується.

### **1.6 Аналіз технічних засобів компенсації реактивної потужності**

Коли проаналізувати долю споживання реактивної електроенергії на промисловому підприємстві, то можна побачити, що 65% припадає на електродвигуни, 25% - на силові трансформатори і біля 10% - на повітряні мережі та інші електричні приймачі.

Невелике значення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$  викликає збільшення завантаження потужності електрообладнання, зокрема електрогенератори, лінії електропередачі і інші елементи електромереж, включаючи і самого споживача. Збільшення завантаження по потужності спостерігається за рахунок збільшення повного струму через електромережі та обладнання, а також за рахунок перетікання реактивної потужності. Збільшення повного струму тягне за собою збільшення втрат активної електроенергії у всіх елементах електромережі. Збільшення повного струму за рахунок перетікання реактивної потужності створює проблеми при підключенні додаткового активного навантаження.

Основним способом нейтралізації проаналізованих недоліків виступає компенсація реактивної потужності, суть якої полягає в підключенні

паралельно до електроприймача конденсаторного пристрою. Таке підключення рекомендується виконувати найближче до електроприймача [15].

На підприємствах для компенсації реактивної потужності прийнято застосовувати синхронні компенсатори (СК) або косинусні (статичні) конденсатори і компенсація реактивної потужності тут є обов'язковим завданням та має бути економічно обгрунтованим.

Компенсація реактивної потужності на діючому підприємстві дозволяє покращити режим роботи електрообладнання, розвантажити лінії та трансформатори від перетікання реактивної потужності, зменшити долю втрат активної потужності у всіх елементах електромережі підприємства. Такий підхід дозволяє знизити споживання електроенергії на підприємстві до 20% і створити резерв для підключення додаткової активної потужності.

Можна виділити такі основні переваги компенсації реактивної потужності:

- зниження струму в передавальних елементах мережі з метою зменшення перерізу кабельних і повітряних ліній;
- зменшення повної потужності з метою зменшення потужності трансформаторів:

$$\Delta S = \sqrt{P^2 - Q^2} - \sqrt{P^2 - (Q - Q_{кл})^2}; \quad (1.10)$$

- зменшення втрат активної потужності (до 15 %) з метою зниження потужності генераторів на електростанціях:

$$\Delta P = \sqrt{S^2 - (Q - Q_{ск})^2}; \quad (1.11)$$

- при використанні компенсації реактивної потужності спостерігається найкраще використання електроустаткування;
- при використанні компенсації реактивної потужності можна регулювати напругу у вузлі навантаження та підвищувати стійкість електровузла.

Застосовуючи компенсацію реактивної потужності за допомогою пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП), варто також згадати і про регулювання потужності за допомогою автоматики. У цьому випадку необхідно провести аналіз декількох режимів роботи ПКРП.

I. Оптимальний режим ПКРП: у цьому режимі КП видає реактивну потужність за необхідною потребою.

II. Режим недокомпенсації ПКРП: у цьому режимі КП видає недостатню кількість реактивної потужності і значна частина реактивної потужності споживається із мережі. Цьому режиму присутні деякі недоліки:

- потрібно збільшувати перерізи повітряних та кабельних ліній, оскільки через всі елементи мережі протікає великий реактивний струм;
- потрібно завищувати потужність силових трансформаторів та їх кількість для збільшення повної потужності;
- зростають втрати активної потужності у всіх елементах мережі;
- неефективно використовується обладнання, яке завантажене реактивним струмом, що зменшує економічний режим роботи, знижується термін служби обладнання.

III. Режим перекомпенсації ПКРП: у цьому режимі КП видає надлишкову реактивну потужність, яка попадає в мережу. Цьому режиму також присутні деякі недоліки:

- має місце підвищення зайвих втрат активної потужності, що виникають внаслідок перекомпенсації;
- суттєво підвищується рівень напруги у години піку навантажень, що призводить до швидкого зношення та старіння ізоляції обмоток електричних двигунів, скорочується термін служби ламп розжарювання та нагрівальних приладів, швидке скорочення терміну служби силових конденсаторів та виходу їх з ладу;
- має місце зниження стійкості вузла навантаження, до якого підключено підприємство, що збільшує ризик виникнення великої системної аварії;

- генерація реактивної потужності у мережу при відсутності відповідного договору з енергосистемою жорстко контролюється та штрафується.

Отже, маємо два способи регулювання потужності КП: ручне і автоматичне керування [16].

При *ручному керуванні* передбачається наявність кваліфікованого обслуговуючого персоналу для комутації секції КП, щоб добитись максимального наближення до оптимального режиму роботи КП.

*Автоматичне керування* здійснюється за допомогою різних блоків автоматики. Головною метою автоматики керування є усунення недоліків ручного управління потужністю КП, а це має свої переваги, зокрема відсутність обслуговуючого персоналу, контроль споживання реактивної потужності підприємством та плавне регулювання потужності КП.

Варто зауважити, що блокам автоматики керування також притаманні свої переваги і недоліки.

## **1.7 Вплив компенсації реактивної потужності на систему електропостачання**

Основним споживачем електричної енергії зазвичай є промисловість, на якому в якості основних електроприймачів виступають асинхронні двигуни (крани, верстати, приводи і ін.), далі слідує силові та зварювальні трансформатори (трансформатори перетворюють більшу частину електроенергії, але мають доволі великі втрати, тобто споживання електроенергії), ще частина припадає на інші електроприймачі (електропечі, котли, ТЕНи, ЛЕП та ін.) [17]. При компенсації реактивної потужності в цехових електромережах застосовують низьковольтні конденсатори з метою зниження втрат активної потужності в елементах мережі, які створюються реактивною складовою навантаження. Тут варто враховувати, що компенсація реактивної потужності навантаження викликає підвищення напруги в цеховій електромережі і, відповідно, збільшення споживання активної потужності. Тому при вирішенні



задачі компенсації реактивної потужності навантаження паралельно необхідно регулювати напругу в цеховій електромережі з метою недопущення зростання споживання електричної енергії.

Можна розрахувати у загальному вигляді фактичні зміни втрат активної потужності та споживання активної та реактивної потужності при компенсації реактивної потужності навантаження, беручи до уваги режим напруги для ділянки мережі (рис.1.7).

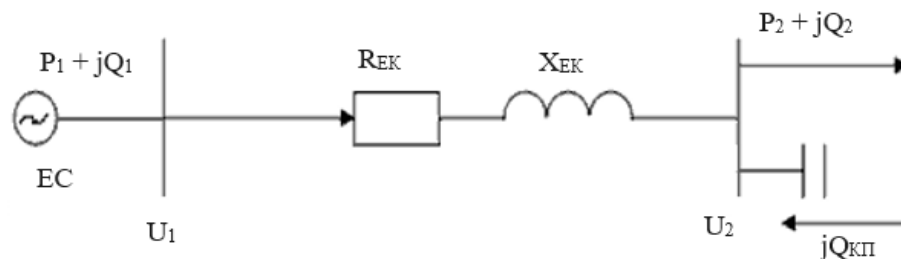


Рисунок 1.7 - Схема заміщення системи зовнішнього електропостачання

У схемі навантаження мережі представлено параметрами потужності  $P_2$  та  $Q_2$ , а джерело реактивної потужності КП -  $Q_{КП}$ . Опори  $R_{ЕК}$  та  $X_{ЕК}$  характеризують параметри електромережі (лінію електропередачі), де присутні втрати потужності  $\Delta P_{12}$  та  $\Delta Q_{12}$ . Витрата електроенергії від енергетичної системи (ЕС) характеризується параметрами потужності  $P_1$  та  $Q_1$ .

Баланс активної та реактивної потужності мережі можна подати у наступному вигляді:

$$P_1(U) = P_2(U) + \Delta P_{12}(U) \quad (1.12)$$

$$Q_1(U) = Q_2(U) + \Delta Q_{12}(U)$$

При нормальних відхиленнях напруги залежності споживаного навантаження активної і реактивної потужності від напруги можна представити у такому вигляді [13]:

$$P_2(U) = P_2 \cdot U_{2*}^a \quad (1.13)$$

$$Q_2(U) = Q_2 \cdot U_{2*}^b$$

де  $U_{2*} = \frac{U_2}{U_{ном}}$  - відносна напруга у вузлі навантаження;

$a$  та  $b$  – значення коефіцієнтів апроксимації;

$P_2$  і  $Q_2$  – значення активної та реактивної потужності навантаження (при  $U_2 = U_{ном}$ ).

Статичні характеристики навантаження дозволяють уявити втрати активної потужності в мережі:

$$\Delta P_{12}(U) = \frac{R_{ек}}{U_{ном}^2} \cdot P_2^2 \cdot U_{2*}^{2(a-1)} + \frac{R_{ек}}{U_{ном}^2} \cdot Q_2^2 \cdot U_{2*}^{2(b-1)} \quad (1.14)$$

$$\Delta Q_{12}(U) = \frac{X_{ек}}{U_{ном}^2} \cdot P_2^2 \cdot U_{2*}^{2(a-1)} + \frac{X_{ек}}{U_{ном}^2} \cdot Q_2^2 \cdot U_{2*}^{2(b-1)}$$

При підключенні КП до вузла навантаження, дійсне споживання реактивної потужності з електромережі буде наступним:

$$Q_2' = Q_2 - Q_{кв} = Q_2(1 - \gamma), \quad (1.15)$$

де  $\gamma$  - ступінь компенсації реактивної потужності навантаження.

Коли  $\gamma=1$ , то споживання реактивної потужності з електромережі немає. При цьому змінюється статична характеристика навантаження та коефіцієнт  $b$  отримає нове значення:

$$b' = b \cdot \frac{1}{1-\gamma} - 2 \cdot \frac{\gamma}{1-\gamma}. \quad (1.16)$$

Підключення КП до вузла 2 викликає зростання напруги на величину

$$\delta U_k = X_{ек} \cdot \gamma \cdot \frac{Q_2}{U_2}. \quad (1.17)$$

Враховуючи цю обставину, напругу у вузлі 2 можна представити у такому вигляді:

$$U_{2*к} = U_2 + \frac{X_{ек} \cdot \gamma \cdot Q_2}{U_{ном}^2} \pm \delta U_{T*} \quad (1.18)$$

На основі виконаних вище перетворень споживання активної та реактивної потужності від джерела живлення можна подати у наступному вигляді:

$$P_1(U) = P_2 \cdot U_{2*к}^a + \frac{R_{ек}}{U_{НОМ}^2} \cdot P_2^2 \cdot U_{2*к}^{2(a-1)} + \frac{R_{ек}}{U_{НОМ}^2} \cdot Q_2^2 \cdot (1 - \gamma)^2 \cdot U_{2*к}^{2(a-1)} \quad (1.19)$$

$$Q_1(U) = Q_2 \cdot (1 - \gamma) \cdot U_{2*к}^{b'} + \frac{X_{ек}}{U_{НОМ}^2} \cdot P_2^2 \cdot U_{2*к}^{2(a-1)} + \frac{X_{ек}}{U_{НОМ}^2} \cdot Q_2^2 \cdot (1 - \gamma)^2 \cdot U_{2*к}^{2(b'-1)}$$

Загалом можна констатувати, що в системах електропостачання промислових підприємств компенсація реактивної потужності дозволяє одержати реальну економію електроенергії тільки за умови взаємопов'язаного регулювання реактивної потужності та напруги у вузлах комплексного навантаження.

У виробничих умовах роботи систем електропостачання значення напруги, активної та реактивної потужності навантаження у вузлах та гілках схеми можуть змінюватися у широких межах і є результатами випадкових функцій. Тому процес компенсації реактивної потужності та регулювання напруги як засобу економії електроенергії можуть дати відчутний ефект у вигляді зниження електричного споживання підприємств при умові реалізації управління реактивною потужністю та напругою в реальному часі [18].

## 1.8 Висновки до розділу 1

1. Виконаний у цьому розділі роботи аналіз показав, що у системі електропостачання промислових підприємств присутні значні втрати електроенергії, що пов'язано із низьким коефіцієнтом потужності мережі. Це створює додаткові економічні витрати та негативно впливає на якість електричної енергії. У мережах низької напруги систем електропостачання промислових підприємств найбільше застосування отримали ПКРП на базі конденсаторних батарей, використання яких обумовлено їх невеликою ціною, нескладним встановленням та обслуговуванням.

2. З метою зниження завантаження технологічного обладнання цехів та виробництв обґрунтовано необхідність та доцільність сумісного регулювання режимів реактивної потужності та напруги в системах електропостачання промислових підприємств, що дозволяє отримати зниження електричного споживання у вузлах навантаження.

3. Зроблено висновок про неефективне застосування конденсаторних ПКРП у системі електричного постачання промислового підприємства при груповому навантаженні.

## 2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Дослідження систем управління конденсаторними установками компенсації реактивної потужності

Найбільше застосування в системі електропостачання промислових підприємств мають установки компенсації реактивної потужності при використанні батарей статичних конденсаторів, які призначені для компенсації індуктивної складової та регулювання коефіцієнта потужності. У зв'язку з тим, що кількість споживаної підприємством електричної енергії змінюється протягом доби, відповідно, змінюється і потреба в реактивній потужності. У першому розділі кваліфікаційної роботи було проведено аналіз існуючих установок компенсації реактивної потужності, з чого видно, що всі вони працюють на основі на вимірювання кута зсуву фаз між струмом і напругою.

Стандартну принципову електричну схему низьковольтної конденсаторної установки з автоматичним регулюванням потужності конденсаторних батарей приведено на рис. 2.1.

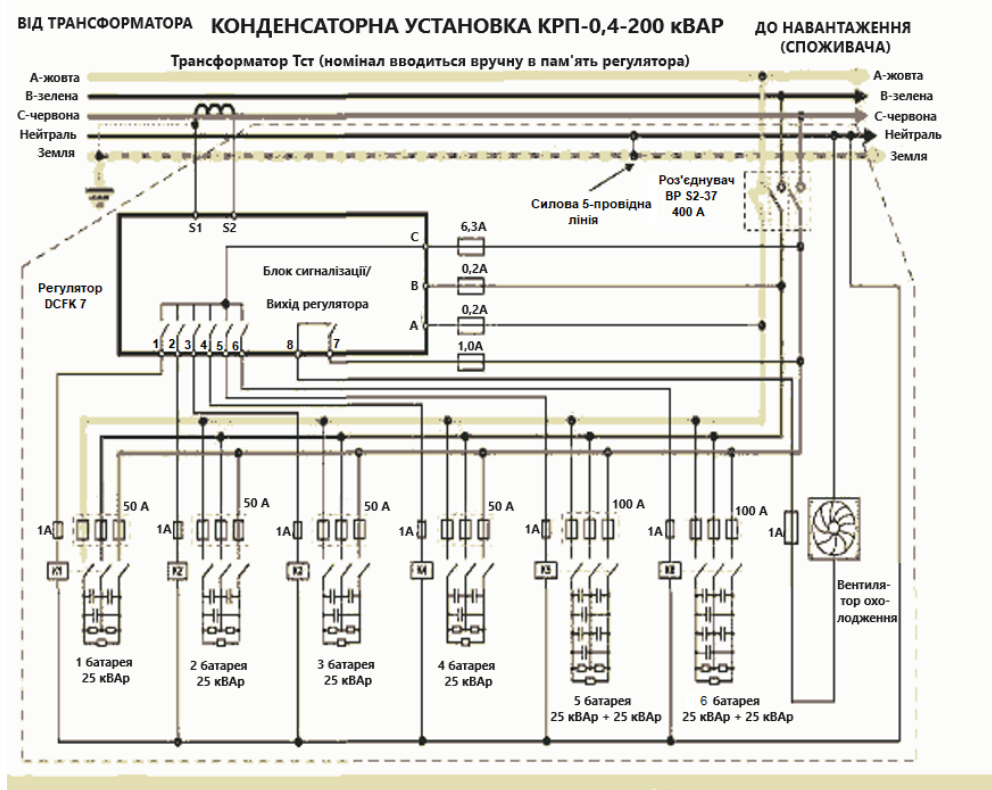


Рисунок 2.1 – Електрична схема конденсаторної установки КРП-0,4-200

кВар

На рис.2.2 приведено розроблену структурну схему пристрою компенсації реактивної потужності, а на рис. 2.3 - блок-схему алгоритму роботи пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП).



Рисунок 2.2 - Структурна схема пристрою керування конденсаторною установкою

## 2.2 Дослідження вектора напруги на шинах вузла навантаження

Задача формування вектора напруги на шинах синхронного компенсатора має декілька наближених рішень, зокрема, до яких можна віднести:

- знаходження напруги на шинах синхронного компенсатора через падіння напруги на активному опорі навантаження;
- метод неповного диференціювання – без врахування трансформаторної е.р.с. та е.р.с. обертання у рівнянні статора синхронного компенсатора.

Проведений аналіз згаданих методів з метою можливого їх застосування для формування вектора напруги на шинах синхронного компенсатора виявив відсутність необхідної універсальності.

Для усунення виявленого недоліку в кваліфікаційній роботі пропонується сформуванню вектора напруги на шинах синхронного компенсатора за допомогою методу двох вузлів. Під цим методом будемо приймати метод розрахунку електричних кіл, у яких шуканим значенням є напруга між двома вузлами схеми з наступним визначенням струмів у гілках електричного кола [19].

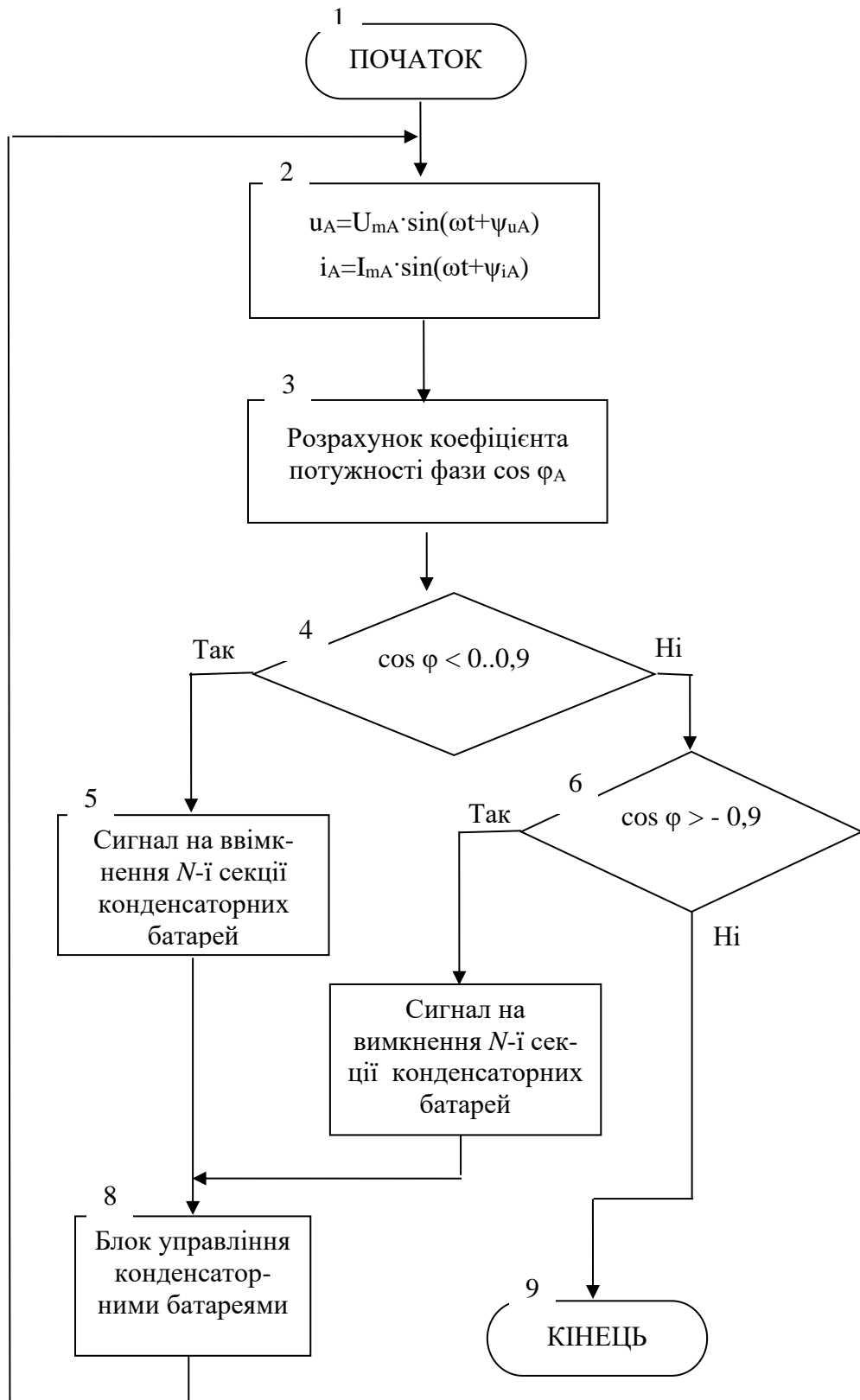


Рис.2.3 – Блок-схема алгоритму роботи ПКРП

Завжди існує можливість виділити гілку компенсації реактивної потужності, яка є еквівалентною пасивному та еквівалентному асинхронному навантаженню. Гілка компенсації реактивної потужності на базі синхронного компенсатора представлена джерелом внутрішньої е.р.с.  $E_i$  з внутрішнім опором  $Z = r_s + jX_{\sigma s}$ , де  $E_i$  розраховується за допомогою рівнянь Парка-Горєва в модифікації Веретенникова Л.П. з урахуванням перехідних процесів у статорі синхронного компенсатора. Еквівалентне пасивне навантаження є характеристикою статичного активно-індуктивного навантаження. Еквівалентне асинхронне навантаження характеризується асинхронним двигуном, який виражений рівняннями Парка-Горєва та під'єднаний на шини з напругою  $U$ .

Для моделювання вузла навантаження потрібна єдина система координат, у якій потрібно записати диференціальні рівняння синхронного компенсатора та навантаження у вузлі. Вибір швидкості обертання єдиної системи координат  $\omega_k$  може бути наступним.

Якщо  $\omega_k = \omega_0$  і система координат зчеплена з обертовим магнітним полем, то її називають синхронно обертовою системою координат з позначеннями осей  $X, Y, 0$ . При  $\omega_k = \omega_p$  система координат зчеплена з ротором синхронного компенсатора, яку можна виразити через магнітну асиметрію ротора синхронного компенсатора. Враховуючи, що ротор синхронного компенсатора обертається синхронно з полем, то в подальшому система координат буде системою координат ротора або  $d, q, 0$ . Таким чином, остаточно приймаємо синхронно обертову систему ротора  $(d, q, 0)$  або  $X, Y, 0$ .

При дослідженні електромагнітних перехідних процесів синхронного компенсатора будемо користуватися наступними твердженнями [19].

1. Система координат з диференціальними рівняннями синхронного компенсатора жорстко пов'язана з системою координат обертового поля.
2. Має місце позитивне обертання осей системи координат проти годинникової стрілки.
3. Вісь  $q$  визначає вісь  $d$ .



4. Вектор напруги на шинах розташовується у 1-му квадранті системи координат.

5. Перехідні процеси в машинах змінного струму слід розглядати за допомогою рівнянь Парка-Горєва у модифікації Веретенникова Л.П.

6. Має місце пасивне навантаження лінійне.

7. Активні та індуктивні опори сполучних ліній є рівними нулю або винесені у відповідні параметри елементів синхронного компенсатора.

8. Пасивне навантаження по всіх фазах розподіляється симетрично.

Розглянемо схему заміщення статора синхронного компенсатора (рис. 2.4) та виведемо рівняння статора синхронного компенсатора відповідно до 2-го закону Кірхгофа в ортогональній системі координат.

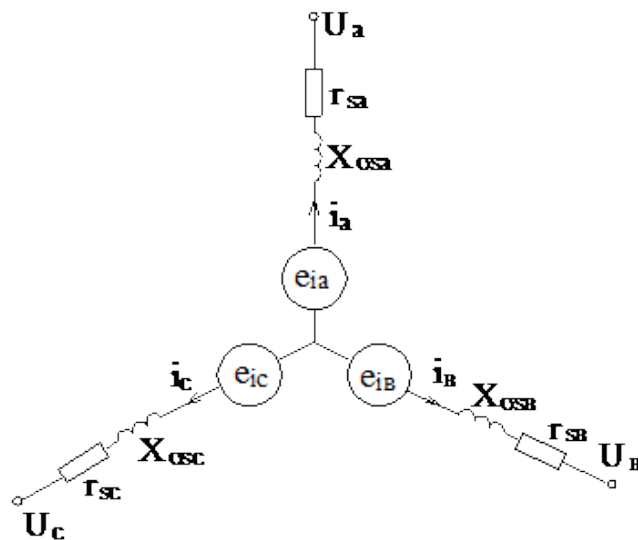


Рисунок 2.4 – Схема заміщення синхронного компенсатора

$$\left. \begin{aligned} e_{ia} - u_a &= r_{sa} \cdot i_{sa} + L_{\sigma sa} \frac{di_{sa}}{dt}; & \frac{2}{3} \\ e_{ib} - u_b &= r_{sb} \cdot i_{sb} + L_{\sigma sb} \frac{di_{sb}}{dt}; & \frac{2}{3} a \\ e_{ic} - u_c &= r_{sc} \cdot i_{sc} + L_{\sigma sc} \frac{di_{sc}}{dt}, & \frac{2}{3} a^2 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

де  $e_{ia}, e_{ib}, e_{ic}$  - величини миттєвих значень внутрішньої е.р.с. фаз  $a, b, c$  синхронного компенсатора;

$u_a, u_b, u_c$  - величини миттєвих значень напруг фаз  $a, b, c$  синхронного компенсатора;

$r_{sa} = r_{sb} = r_{sc} = r_s$  - активні опори фаз статора синхронного компенсатора;

$L_{\sigma sa} = L_{\sigma sb} = L_{\sigma sc} = L_{\sigma s}$  - індуктивності розсіювання фаз статора синхронного компенсатора;

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  - величини миттєвих значень струмів статора фаз  $a, b, c$  синхронного компенсатора.

Дальше запишемо рівняння статора у векторній формі в нерухомій системі координат:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3}(e_{ia} + ae_{ib} + a^2e_{ic}) - \frac{2}{3}(u_{sa} + au_{sb} + a^2u_{sc}) = \\ & = r_s \frac{2}{3}(i_{sa} + ai_{sb} + a^2i_{sc}) + L_{\sigma s} \frac{d\left[\frac{2}{3}(i_{sa} + ai_{sb} + a^2i_{sc})\right]}{dt}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де 
$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

$$\bar{E}_i - \bar{U} = r_s \bar{I} + L_{\sigma s} \frac{\omega_0}{\omega_0} \frac{d\bar{I}}{dt}$$

або

$$\bar{U} = \bar{E}_i - r_s \bar{I} - X_{\sigma s} \frac{d\bar{I}}{d\omega_0 t}. \quad (2.3)$$

З рівняння (2.3) можна вивести проєкції вектора напруги статора на осі  $d$  і  $q$ :

$$\begin{cases} \bar{U} = u_d + ju_q; \\ \bar{I} = i_d + ji_q; \\ \bar{\Psi} = -\Psi_d + j\Psi_q. \end{cases} \quad (2.4)$$

Враховуючи рівняння (2.4), запишемо у проєкціях на осі  $d$  і  $q$  рівняння статора синхронного компенсатора у синхронному часі:

$$\begin{cases} \frac{d(-\psi_d)}{d\omega_0 t} + j\omega_c(-\psi_d) + r_s i_d = -u_d; \\ \frac{d\psi_q}{d\omega_0 t} + j\omega_c \psi_q + r_s i_q = -u_q. \end{cases} \quad (2.5)$$

З векторної діаграми синхронного компенсатора (рис. 2.5), можна виразити проекції вектора напруги на шинах навантаження на осі  $d$  і  $q$ :

$$u_d = X_q i_q - r_s i_d, \quad (2.6)$$

$$u_q = e_{af} - X_d i_d - r_s i_q. \quad (2.7)$$

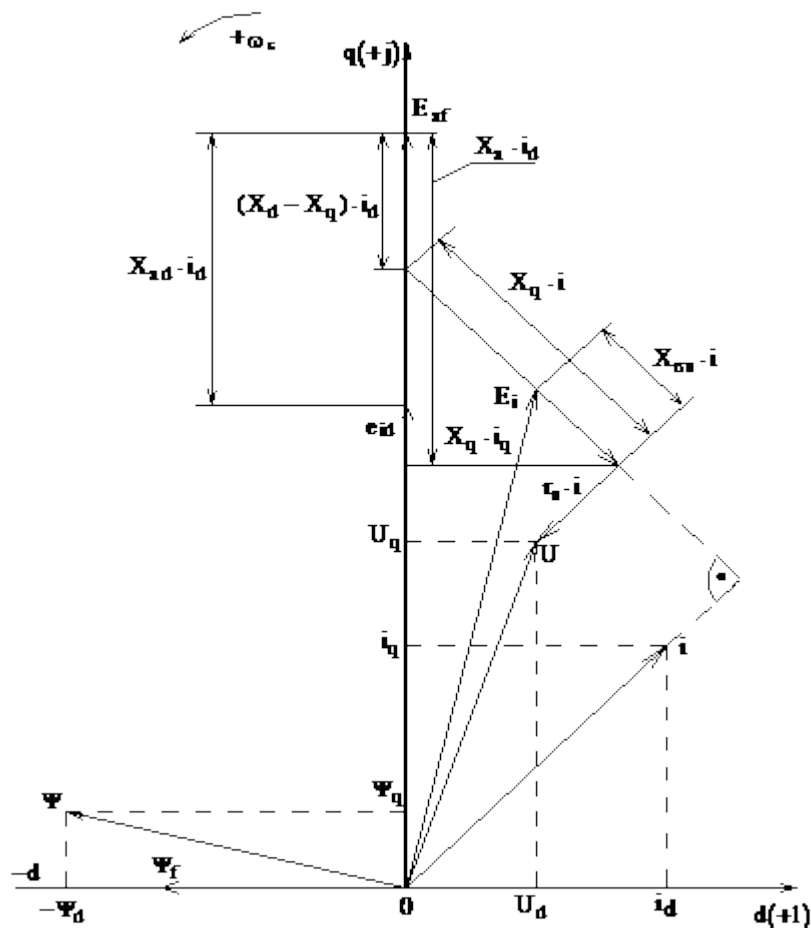


Рисунок 2.5 - Векторна діаграма синхронного компенсатора

Помножимо рівняння (2.7) на  $j$  і складемо його з рівнянням (2.6), в результаті отримаємо:

$$j e_{af} - j X_d i_d + X_q i_q - j r_s i_q - r_s i_d = u_d + j u_q. \quad (2.8)$$

Виконаємо перетворення рівняння (2.8):

$$je_{af} - jX_{ad}i_d + X_{\sigma s}i_d + X_{aq}i_q + X_{\sigma s}i_q - r_s(i_d + ji_q) = u_d + ju_q$$

або

$$j(e_{af} - X_{ad}i_d) + X_{aq}i_q = (u_d + ju_q) + (r_s + jX_{\sigma s})(i_d + ji_q). \quad (2.9)$$

Вектор внутрішньої е.р.с.  $\vec{E}_i$  має свою особливість і беручи до уваги математичний зв'язок

$$\vec{\Psi} = j\vec{E}_i \quad (2.10)$$

та прийняте положення вектора потокозчеплення на комплексній площині (рис.2.5)  $\Psi = -\Psi_d + j\Psi_q$ , його можна записати у наступному вигляді:

$$E_i = e_{id} + je_{iq}. \quad (2.11)$$

Чисельне значення проекції  $e_{id}$ , що відстає на  $0,5\pi$  від проекції  $-\Psi_d$ , визначаємо з наступного виразу:

$$e_{id} = e_{af} - X_{ad}i_d. \quad (2.12)$$

Чисельне значення проекції  $e_{iq}$ , що відстає на  $0,5\pi$  від проекції  $\Psi_q$ , визначається за наступною формулою:

$$e_{iq} = X_{aq}i_q. \quad (2.13)$$

З векторної діаграми (рис. 2.5) можна записати чисельні значення проекцій вектора  $\vec{\Psi}$  на осі  $d$  і  $q$ :

$$\Psi_d = e_{af} - X_{ad}i_d. \quad (2.14)$$

$$\Psi_q = X_{aq}i_q. \quad (2.15)$$

Коли відняти з (2.12) вираз (2.14), то можна отримати проекцію вектора струму статора синхронного компенсатора на вісь  $d$ :

$$i_d = X_{\sigma s}^{-1}(e_{id} - \Psi_d). \quad (2.16)$$

Так само відніmemo з (2.13) вираз (2.15) та отримаємо проекцію вектора струму статора синхронного компенсатора на вісь  $q$ :

$$i_q = X_{\sigma s}^{-1}(\Psi_q - e_{iq}) \quad (2.17)$$

Виразимо з рівняння (2.9) з урахуванням рівнянь (2.12) та (2.13) проекції вектора напруги на статорі синхронного компенсатора:

$$\begin{cases} u_d = je_{id} - r_s i_d + X_{\sigma s} i_q = -e_{id} - r_s i_d + X_{\sigma s} i_q; \\ u_q = e_{iq} - r_s i_q - X_{\sigma s} i_d. \end{cases} \quad (2.18)$$

Підставивши рівняння (2.17) в рівняння (2.5), отримаємо диференціальні рівняння статора синхронного компенсатора через проекцію векторів внутрішньої е.р.с., потокозчеплень і струмів статора в синхронному часі, які приведені до відносного вигляду за допомогою системи відносних одиниць статора:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{d\omega_0 t} = -e_{id} - [\omega_c \Psi_q] + X_{\sigma s} i_q; \\ \frac{d\Psi_q}{d\omega_0 t} = -e_{iq} + [\omega_c \Psi_d] + X_{\sigma s} i_d \end{cases} \quad (2.19)$$

Підставивши рівняння (2.16) і (2.17) в рівняння (2.19), отримаємо рівняння статора (без струму):

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{d\omega_0 t} = -e_{id} - [\omega_c \Psi_q] + \Psi_q - e_{iq}; \\ \frac{d\Psi_q}{d\omega_0 t} = -e_{iq} + [\omega_c \Psi_d] + e_{id} - \Psi_d \end{cases} \quad (2.20)$$

Виразимо модуль напруги статора синхронного компенсатора за допомогою наступної формули:

$$\vec{U} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$$

Запишемо на підставі 2-го закону Кірхгофа диференціальні рівняння ротора синхронного компенсатора у проекціях на осі  $d$  та  $q$  у синхронному часі, які приведені до відносного вигляду за допомогою системи відносних одиниць ротора:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_f}{d\omega_0 t} = \frac{1}{T_{do}} u_f - \frac{X_f}{T_{do} X_{\sigma f}} \Psi_f + \frac{X_{ad}}{T_{do} X_{\sigma f}} e_{id}; \\ \frac{dU_f}{d\omega_0 t} = KU_{\text{ур}} - U_f \end{cases} \quad (2.21)$$

де 
$$e_{id} = \alpha^{-1} \left( \frac{X_{ad}}{X_{\sigma s}} \Psi_d + \frac{X_f}{X_{\sigma f}} \Psi_f \right);$$

$$e_{iq} = \beta^{-1} \left( \frac{X_{aq}}{X_{\sigma s}} \Psi_q \right);$$

$$\alpha = 1 + X_{ad} (X_{\sigma s}^{-1} + X_{\sigma f}^{-1});$$

$$\beta = 1 + X_{aq} (X_{\sigma s}^{-1}).$$

Для практичного застосування проведених досліджень під час моделювання синхронного компенсатора необхідно відзначити наступні моменти:

- вектор напруги на вузлі навантаження, визначений методом двох вузлів, розташовується у першому квадранті під кутом  $\approx 45^\circ$ ;

- всі складові навантаження повинні зводитися до власних базисів. Для цього потрібно фізичні величини (наприклад, напругу і струм) помножити на свій базис і поділити на базис синхронного компенсатора.

Формування вектора напруги на шинах вузла навантаження було використано при математичному описі імітаційної моделі синхронного компенсатора, що працює на активно-індуктивне та асинхронне навантаження (Додаток А).

### 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Розробка моделі давача асиметрії для системи управління ПКРП

Вимірювач пристрою компенсації реактивної потужності є фазометром, який призначений для вимірювання зсуву фаз між двома періодичними сигналами. Спочатку вхідні сигнали перетворюються на прямокутні імпульси, а потім вони підсумовуються і в результаті маємо величину кута зсуву фаз  $\varphi$ .

Використовуючи аналогову модель вимірювача, в кваліфікаційній роботі було запропоновано метод визначення кута зсуву фаз між струмом та напругою електромережі промислового підприємства. Від системи електропостачання через трансформатор струму, встановленого в одній із фазі, на вимірювач попадає два синусоїдальні сигнали, зокрема миттєві струм  $i$  та напруга  $u$  мережі (рис.3.1):

$$\begin{aligned} u &= U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) \\ i &= I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned}, \quad (3.1)$$

де  $U_m$  – значення максимальної амплітуди напруги фази мережі;

$I_m$  – значення максимальної амплітуди струму однойменної фази мережі;

$\psi_u$  – зсув фази за напругою;

$\psi_i$  – зсув фази за струмом.

Кут зсуву фаз можна визначити з миттєвої потужності мережі за формулою:

$$\begin{aligned} p &= U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m (\cos((\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i)) - \cos((\omega t + \psi_u) + (\omega t + \psi_i))) = \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \cdot (\cos(\psi_u - \psi_i) - \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Значення зсуву фаз між струмом і напруги буде рівне:

$$(\psi_u - \psi_i) = \arccos \left[ \frac{2 \cdot p}{U_m \cdot I_m} + \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i) \right] \quad (3.3)$$

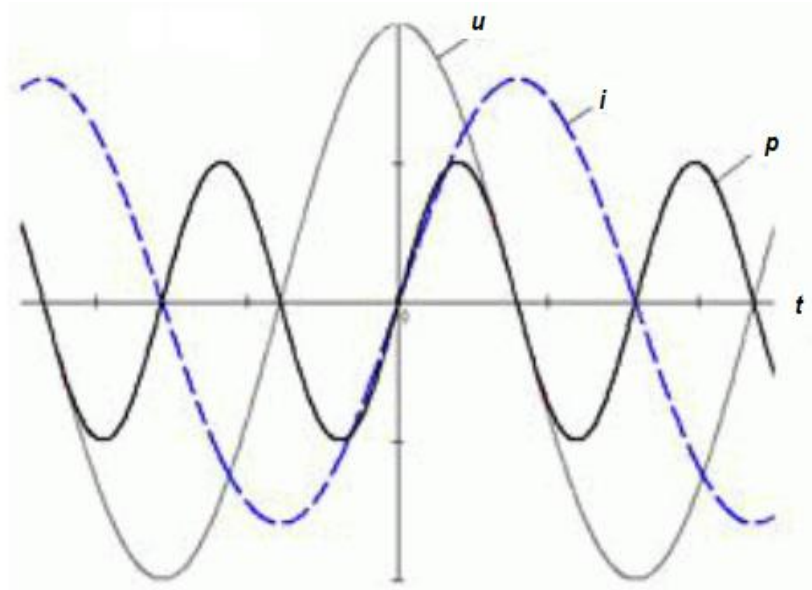


Рисунок 3.1 – Сигнали напруги та струму однойменної фази промислової мережі

При розв'язку задачі визначення кута зсуву фаз у мережі однофазного струму виникає проблема знаходження амплітудних значень струму та напруги. Нижче представлена математична розроблена модель для визначення амплітуди синусоїдального сигналу  $A \cdot \sin(\omega t)$ .

1. Виконаємо множення досліджуваного сигналу  $A \cdot \sin(\omega t)$  на  $B \cdot \sin(\omega t)$  і на  $B \cdot \cos(\omega t)$ :

$$\begin{aligned} A \cdot \sin(\omega t) \cdot B \cdot \sin(\omega t) &= A \cdot B \cdot \sin^2(\omega t); \\ A \cdot \sin(\omega t) \cdot B \cdot \cos(\omega t) &= \frac{A \cdot B}{2} \cdot \sin(2\omega t); \end{aligned} \quad (3.4)$$

2. Виконаємо операцію інтегрування отриманих виразів:

$$\begin{aligned} \int_0^t A \cdot B \cdot \sin^2(\omega t) dt &= \frac{A \cdot B}{2} \cdot \int_0^t (1 - \cos(2\omega t)) dt = \frac{A \cdot B}{2} \left( t - \frac{\sin(2\omega t)}{2\omega} \right); \\ \int_0^t \frac{A \cdot B}{2} \cdot \sin(2\omega t) dt &= -\frac{A \cdot B}{2} \cdot \cos(2\omega t); \end{aligned} \quad (3.5)$$



3. Виконаємо операцію зсуву на період  $T$ :

$$\begin{cases} \frac{A \cdot B}{2} \left( t - \frac{\sin(2\omega t)}{2\omega} \right); \\ \frac{A \cdot B}{2} \left( t - \frac{\sin(2\omega t + T)}{2\omega} \right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\frac{A \cdot B}{4\omega} \cdot \cos(2\omega t); \\ -\frac{A \cdot B}{4\omega} \cdot \cos(2\omega t + T). \end{cases} \quad (3.6)$$

4. Виконаємо операцію підсумовування виразів у дужках:

$$\frac{A \cdot B}{2} \left( t - \frac{\sin(2\omega t)}{2\omega} - t + \frac{\sin(2\omega t + T)}{2\omega} \right) = \frac{A \cdot B}{2\omega} \cdot \cos\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right);$$

$$\frac{A \cdot B}{4\omega} (\cos(2\omega t + T) - \cos(2\omega t)) = -\frac{A \cdot B}{2\omega} \cdot \sin\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right). \quad (3.7)$$

5. Отримані вирази піднесемо до квадрату:

$$\left(\frac{A \cdot B}{2\omega}\right)^2 \cdot \cos^2\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right);$$

$$\left(-\frac{A \cdot B}{2\omega}\right)^2 \cdot \sin^2\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right). \quad (3.8)$$

6. Виконавши додавання цих виразів, отримаємо:

$$\left(\frac{A \cdot B}{2\omega}\right)^2 \cdot \cos^2\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right) + \left(-\frac{A \cdot B}{4\omega}\right)^2 \cdot \sin^2\left(2\omega t + \frac{T}{2}\right) = \left(\frac{A \cdot B}{2\omega}\right)^2; \quad (3.9)$$

7. Корінь квадратний:

$$\sqrt{\left(\frac{A \cdot B}{2\omega}\right)^2} = \left(\frac{A \cdot B}{2\omega}\right), \quad (3.10)$$

де  $\omega = 2\pi \cdot f$  – циклічна частота (рад/с),

$f = 50$  – частота мережі (Гц).

Якщо амплітуду допоміжних сигналів прийняти рівною  $B = 100$ , то в підсумку отримаємо значення амплітуди досліджуваного сигналу  $A$ . Знаючи

значення амплітуди струму та напруги, можна виразити  $\cos\varphi$  з миттєвої потужності мережі.

### 3.2 Моделювання вимірювальної частини конденсаторного ПКРП

Проектування довільної системи управління в більшості випадків є доволі складною задачею, успішний розв'язок якої залежить від правильного вибору всіх її параметрів. Більшість поставлених завдань зводиться, зазвичай, до розв'язку систем рівнянь [20].

При створенні системи управління етапом ще перед розробкою її технічної реалізації системи, необхідно дослідити працездатність системи за допомогою моделювання. З метою спрощення процедури моделювання та її багатоваріантного аналізу системи зазвичай використовують проблемно-орієнтовані пакети прикладних програм. В даний час найбільше застосування отримала система інженерних та наукових обчислень MatLab з пакетом розширення візуального моделювання Simulink [21].

В кваліфікаційній роботі було виконано моделювання розробленої математичної моделі вимірювальної частини конденсаторного ПКРП у програмі MatLab із пакетом розширення візуального моделювання Simulink. На рис. 3.2 приведено схему визначення амплітуди синусоїдального сигналу з наступними позначеннями:

*Sine Wave* – досліджуваний синусоїдальний сигнал мережі;

$100 \cdot \cos(\omega t)$  та  $100 \cdot \sin(\omega t)$  – допоміжні синусоїдальні сигнали;

*Prod1* та *Prod2* – елемент множення сигналів;

*Int1* та *Int2* – елементи інтегрування сигналів;

*T1* і *T2* – елементи усунення сигналів на період  $T=1/f$ ;

*Sum*, *Sum1* та *Sum2* – елементи підсумовування сигналів;

*Func*, *Func1* та *Func2* – функції математичних операцій;×

*Display* – елемент виводу інформації;

*Scope* – осцилограф.

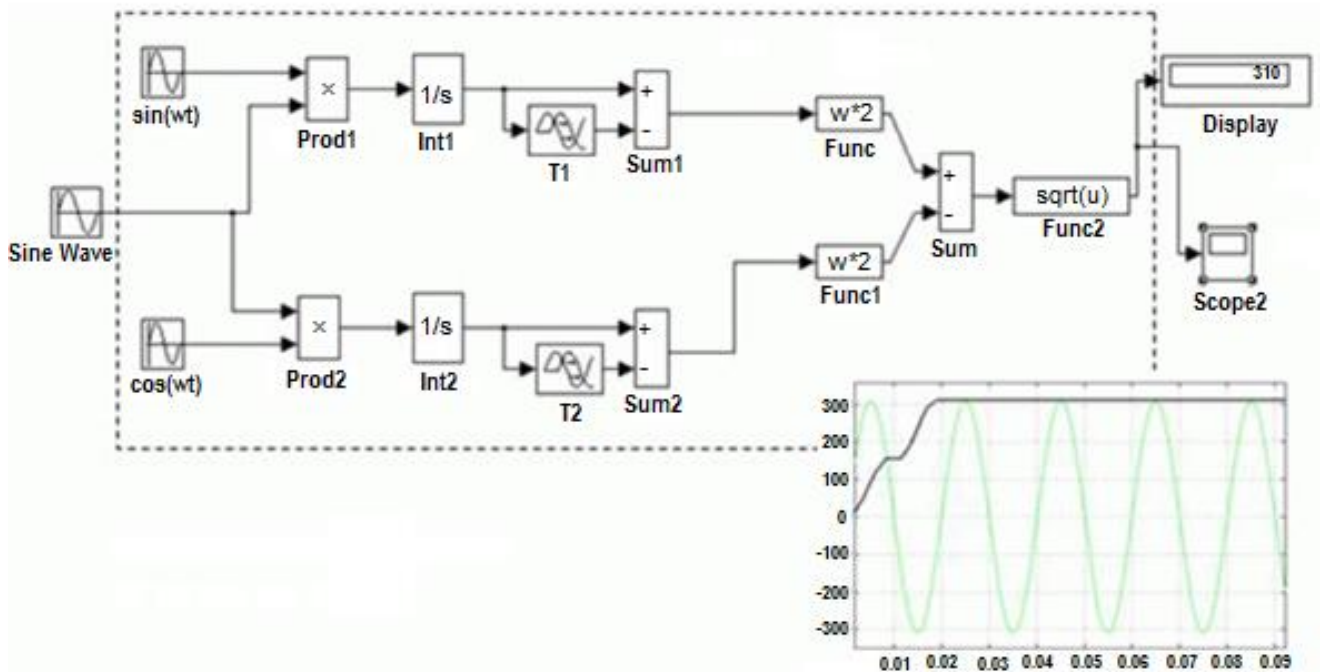


Рисунок 3.2 – Схема визначення амплітуди синусоїдального сигналу

На рис. 3.3 представлено схему виміральної частини системи управління потужністю батарей статичних конденсаторів з наступними позначеннями:

*Sine Wave* і *Sine Wave1* - синусоїдальні сигнали струму  $I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$  і напруги  $U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ ;

*fs* – значення частоти мережі змінного струму;

*Ramp* – значення елемента часу;

*Subsystem (amplitude I)* – підсистема визначення амплітуди струму;

*Subsystem (amplitude U)* – підсистема визначення амплітуди напруги;

*Subsystem1* і *Subsystem* – підсистема визначення зсуву по фазі струму  $\psi_i$  і напруги  $\psi_u$ .

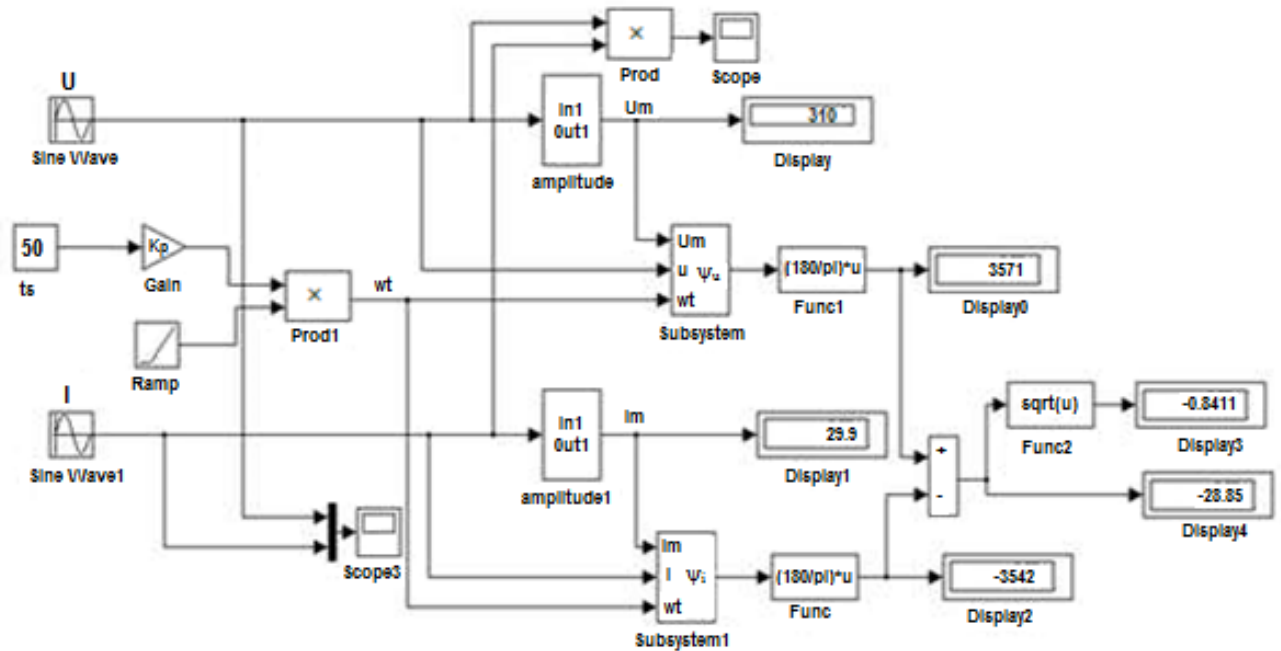


Рисунок 3.3 – Схема вимірювальної частини системи керування потужністю конденсаторних батарей

### 3.3 Алгоритм керування потужністю конденсаторної установки при несиметричному навантаженні

Доволі часто від однієї точки загального приєднання здійснюється живлення як трифазних, так і одно- або двофазних приймачів електроенергії. Через несиметричне споживання потужності фазами можуть виникати фазні струми різної величини в колах живлення цих споживачів, що провокує виникнення несиметрії напруги в точці загального приєднання та погано впливає на роботу багатьох електричних приймачів. Несиметрія напруги характеризується коефіцієнтами несиметрії за зворотною та нульовою послідовністю і державні стандарти доводять такі значення цих показників:  $K_{2U} = 2\%$ ,  $K_{0U} = 4\%$  [23].

Найбільшу чутливість до несиметрії напруги має електрорухоме навантаження з малим опором зворотної послідовності. Різниця напруги між фазами викликає збільшення пульсацій випрямленої напруги. На рис. 3.4-3.6 приведено графіки проведених вимірювань несиметрії фазних напруг, несиметрії міжфазних напруг та коефіцієнтів несиметрії прямої та зворотної послідовностей для підприємства ТОВ “СЕ Борднетце –Україна”.

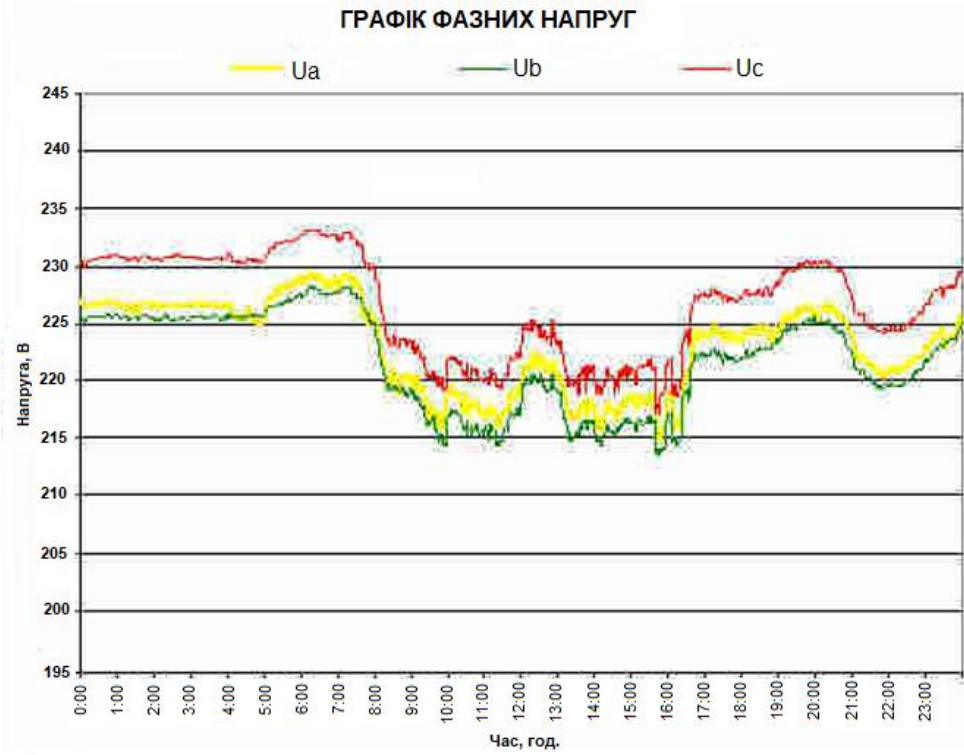


Рисунок 3.4 - Графік фазних напруг

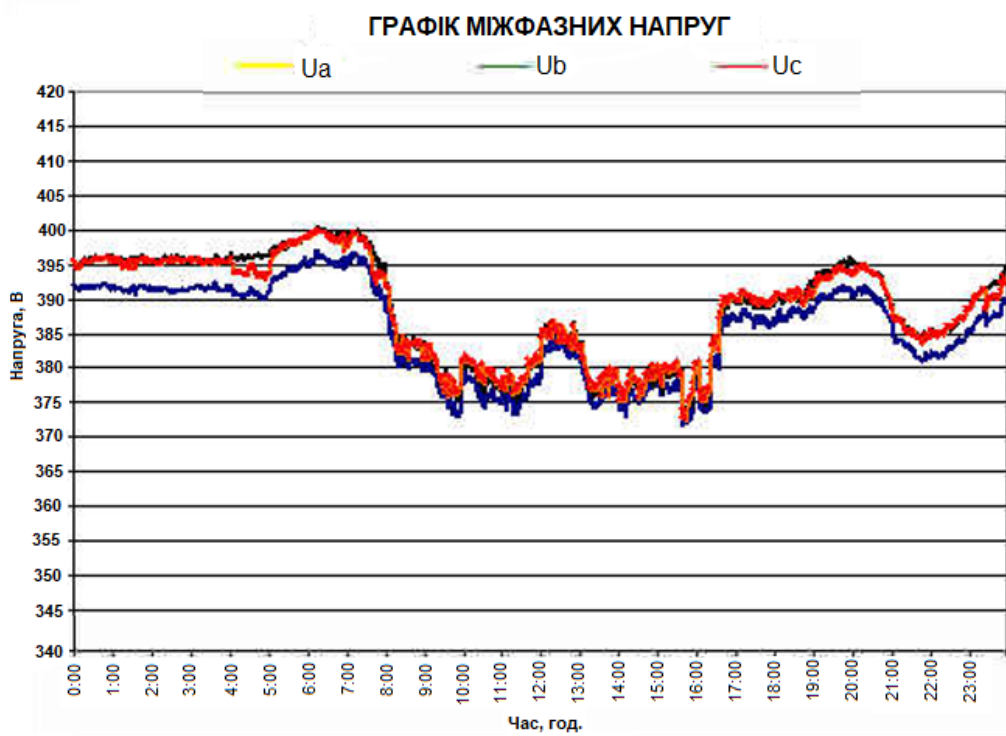


Рисунок 3.5 - Графік міжфазних напруг

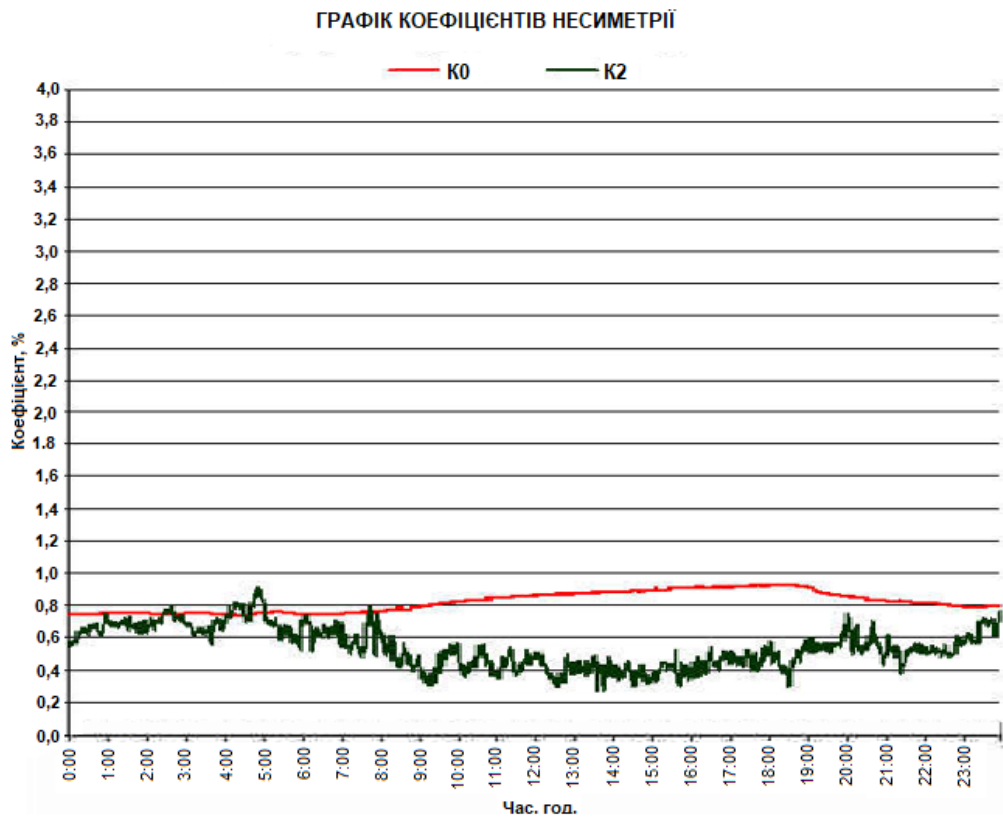


Рисунок 3.6 - *Графік коефіцієнтів несиметрії нульової та зворотної послідовностей*

Графіки побудовані за даними вимірювань якості електричної енергії, а виміри здійснювалися електротехнічною лабораторією підприємства ТОВ “СЕ Борднетце –Україна”. Отримані графіки показників якості електричної енергії мають загальний характер для підприємств міста Тернополя.

Провівши аналіз графіків, можна побачити, що при груповому навантаженні несиметрія напруги за зворотною і нульовою послідовностями завжди має місце, вона виникає через несиметричний розподіл навантажень по фазах, хоч і перебуває у необхідних межах. Несиметричне навантаження по фазах провокує зниження ефекту компенсації реактивної потужності. Використання конденсаторних установок з регулюванням потужності батарей статичних конденсаторів струмом однієї фази призводить до неповної компенсації або перекомпенсації реактивної потужності в інших фазах.

В табл. 3.1 приведені дані вимірів параметрів мережі групового навантаження виробничого цеху підприємства ТОВ “СЕ Борднетце –Україна”, виміри проводились з проміжком кожні 0,5 год.

Таблиця 3.1 - *Результати вимірів параметрів електромережі цеху*

$U_A, B$	$U_B, B$	$U_C, B$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$\cos\varphi_A$	$\cos\varphi_B$	$\cos\varphi_C$
224	229	219	113	119	94	0,62	0,68	0,72
226	226	220	93	110	101	0,64	0,69	0,71
223	226	222	116	104	98	0,63	0,67	0,69
226	231	223	99	102	115	0,64	0,68	0,68
228	231	226	21	28	64	0,8	0,73	0,75
224	228	219	108	88	121	0,62	0,68	0,69
227	226	218	111	106	94	0,61	0,67	0,71
221	226	220	99	113	121	0,64	0,66	0,68
222	229	223	110	108	118	0,62	0,69	0,72

На рис. 3.7 та рис. 3.8 наведено графіки струмів та напруги відповідно при несиметричному навантаженні, яке виникає через наявність великої кількості однофазних приймачів.

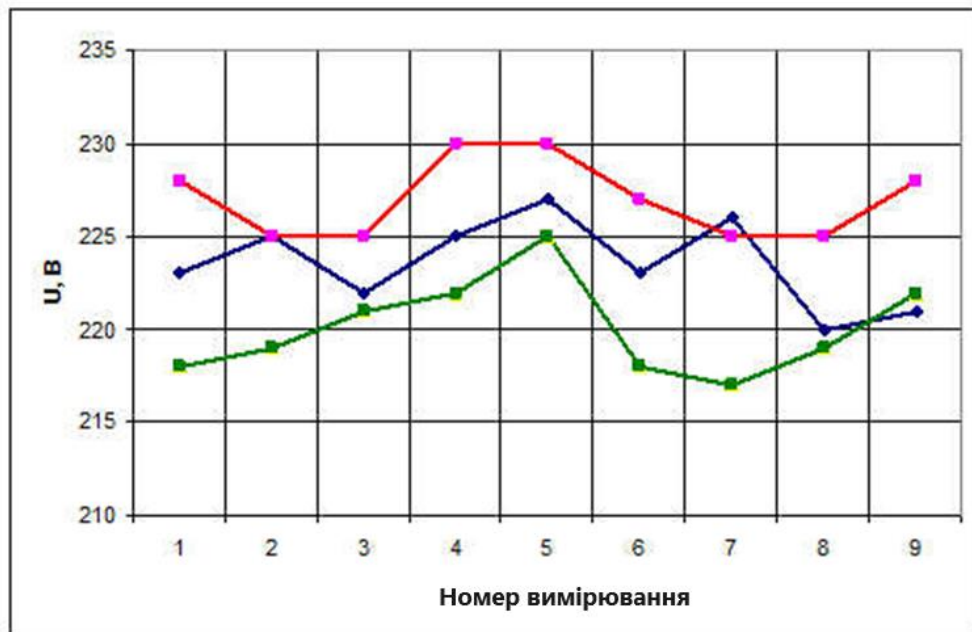


Рисунок 3.7 - *Графік фазної напруги при несиметричному режимі навантаження виробничого цеху*

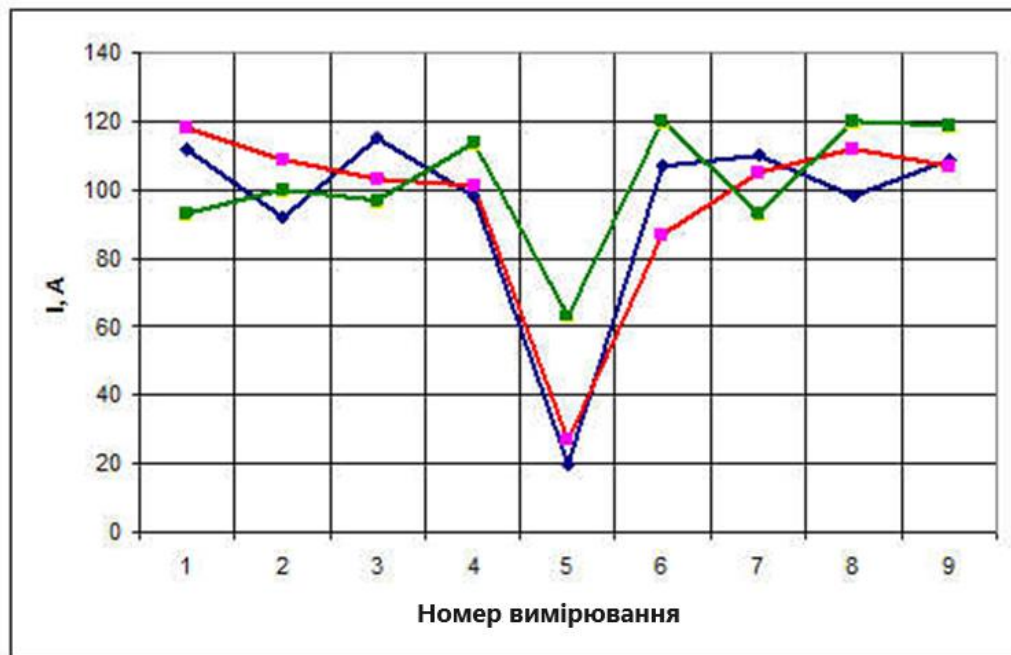


Рисунок 3.8 - Графік струмів при несиметричному режимі навантажень виробничого цеху

Значення потрібної реактивної потужності для підтримки  $\cos\phi$  в кожній фазі виробничого цеху у межах 0,96 приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Активна потужність та потрібна реактивна потужність для підтримки коефіцієнта потужності мережі у межах 0,96

$P_A$ , кВт	$P_B$ , кВт	$P_C$ , кВт	$Q_A$ , кВар	$Q_B$ , кВар	$Q_C$ , кВар
15,21	18,04	14,32	15,36	14,79	10,08
13,05	16,68	15,34	12,27	13,18	11,18
15,83	15,22	14,57	15,67	12,94	11,53
13,91	15,57	17,45	13,08	12,77	13,28
3,22	4,48	10,46	2,35	3,01	6,52
14,56	13,63	17,77	14,73	10,36	14,06
14,92	15,57	14,64	15,51	13,26	10,67
13,59	17,14	18,14	13,74	15,08	13,73
14,67	16,59	18,78	14,85	13,12	13,16

Із отриманих графіків бачимо, що потреба у реактивній потужності кожної фази є різною і вона залежить від індуктивного навантаження. Для



зменшення режимів перекомпенсації і недокомпенсації необхідно враховувати  $\cos\varphi$  кожної фази, зокрема, регулювати потужність конденсаторних пристроїв за допомогою середньозваженого значення коефіцієнтів потужності фаз:

$$\cos\varphi_{CP} = \frac{P_A \cos\varphi_A + P_B \cos\varphi_B + P_C \cos\varphi_C}{P_A + P_B + P_C}. \quad (3.11)$$

Результати скомпенсованої реактивної потужності за значенням середньозваженого коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$  представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку реактивної потужності за середнім коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi$

$\cos\varphi_A$	$\cos\varphi_B$	$\cos\varphi_C$	$\cos\varphi_P$	$Q_{ky}$ , кВар
0,62	0,68	0,72	0,67	13,41
0,64	0,69	0,71	0,68	12,22
0,63	0,67	0,69	0,66	13,38
0,64	0,68	0,68	0,67	13,04
0,71	0,73	0,75	0,73	13,97
0,62	0,68	0,69	0,67	13,05
0,61	0,67	0,71	0,66	13,16
0,64	0,66	0,68	0,67	14,19
0,62	0,69	0,72	0,68	13,68

На рис. 3.9 приведено блок-схему алгоритму керування потужністю батареї статичних конденсаторів при несиметричному навантаженні.

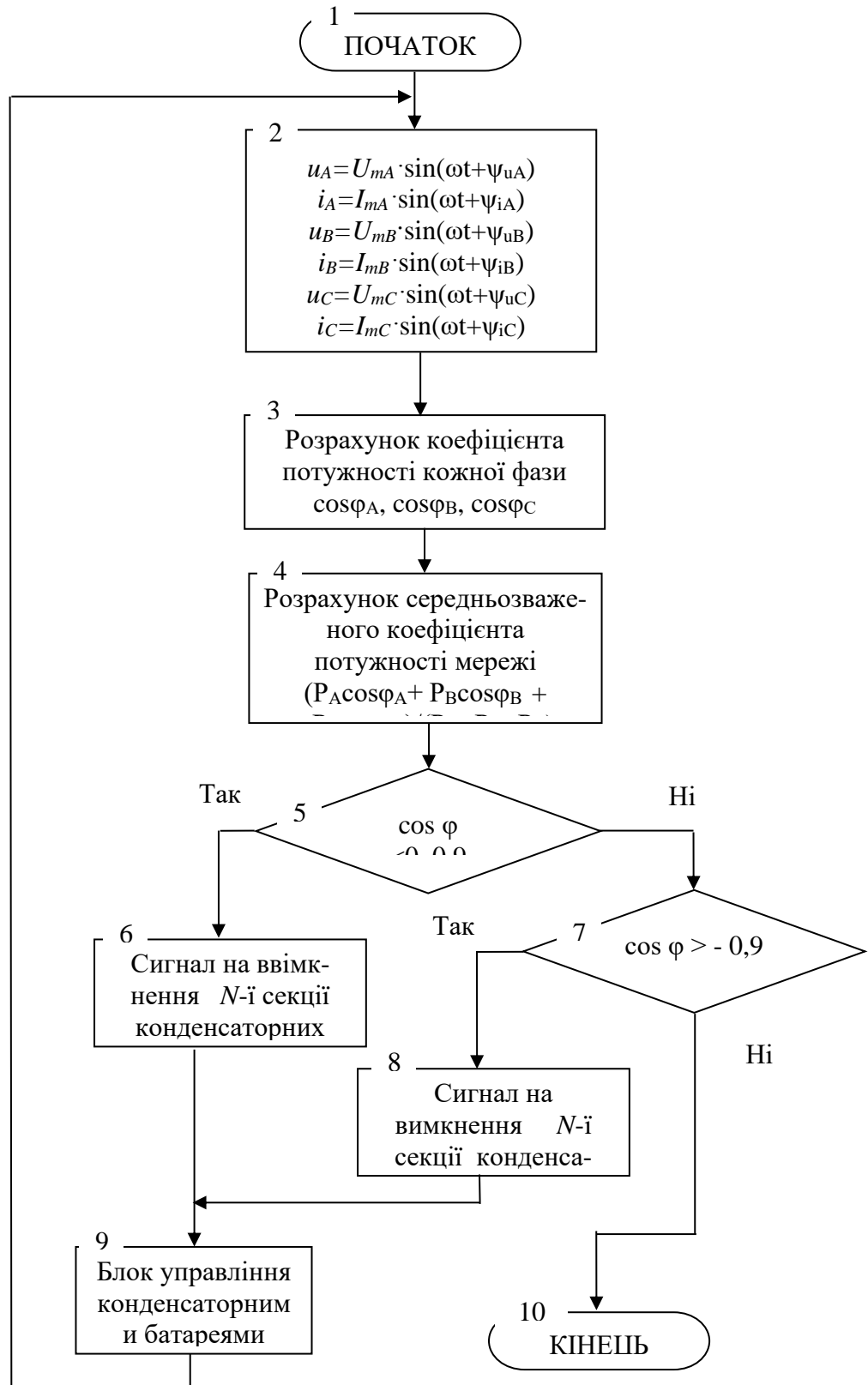


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритму керування потужністю батарей статичних конденсаторів при несиметричному навантаженні

На рис. 3.10 приведено графік споживання реактивної енергії за фазами виробничого цеху підприємства ТОВ “СЕ Борднетце –Україна” та ефективність запропонованого методу регулювання потужності пристрою компенсації реактивної потужності.

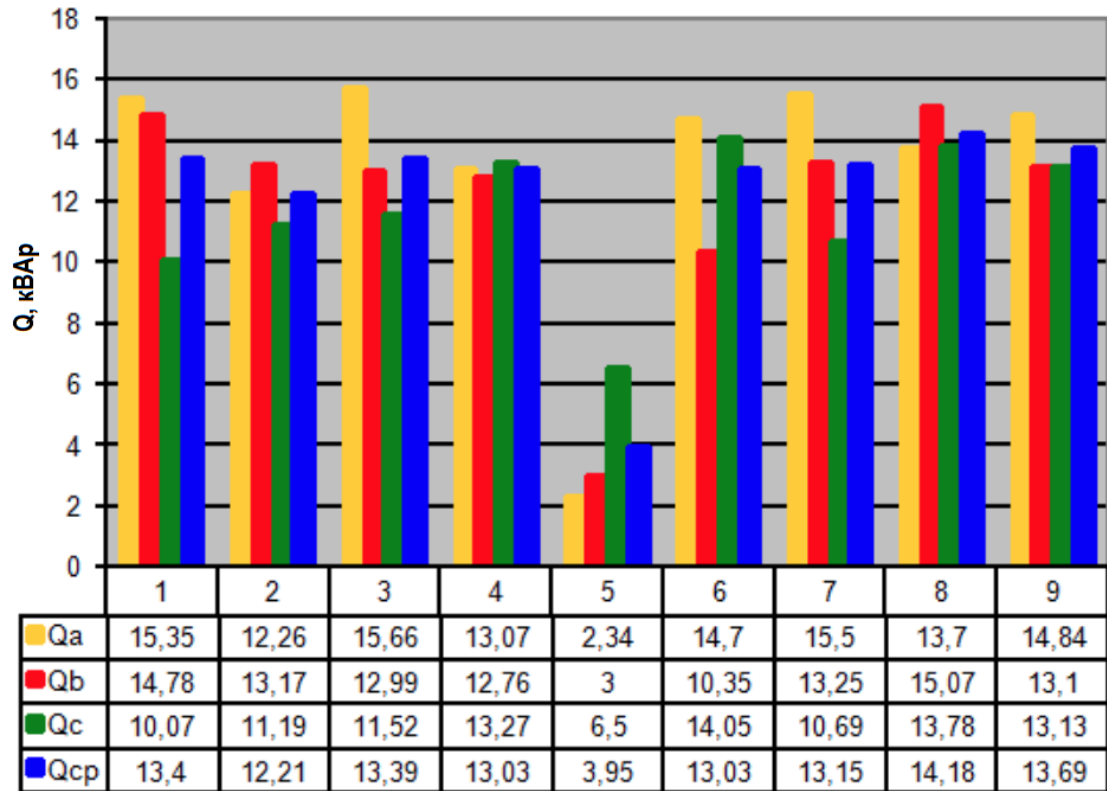


Рисунок 3.10 - Графік споживання реактивної енергії за фазами виробничого цеху підприємства ТОВ “СЕ Борднетце –Україна”

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. При здійсненні групової компенсації реактивної потужності на промисловому підприємстві потрібно враховувати, що навантаження по фазах розподілено нерівномірно. Це викликає нерівномірне споживання реактивної потужності по фазах і як наслідок негативно впливає на роботу пристрою компенсації реактивної потужності.

2. В цьому розділі запропоновано математичну модель пристрою для системи керування конденсаторним пристроєм компенсації реактивної потужності, що дозволяє визначити амплітуду будь-якого синусоїдального сигналу.

3. Розроблено метод управління пристроєм компенсації реактивної потужності при несиметричному навантаженні за фазами, впровадження якого дозволить зменшити втрати електричної енергії в системі електропостачання промислового підприємства за рахунок зменшення режимів перекомпенсації та недокомпенсації в окремих фазах.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Заходи безпеки при експлуатації пристроїв компенсації реактивної потужності

При експлуатації конденсаторних установок необхідно дотримуватися деяких додаткових вимог з техніки безпеки, так як в цих установках наявні значні ємності [25].

Якщо відключений конденсатор своєчасно не розрядити, то випадковий дотик до нього може створити коло розряду, що замикається через тіло людини, яка доторкнулася до нього. Негативні наслідки розряду конденсатора на людський організм залежать від ряду факторів, особливо від ємності конденсатора і від напруги, до якої він був заряджений. Чим більша ємність конденсатора і чим вища його напруга, тим небезпечніше для людини ураження струмом під час розрядки конденсатора [26].

У літературі описано ряд нещасних випадків, що сталися внаслідок випадкового дотику до заряджених конденсаторів в імпульсних і фільтрових електроустановках і при випробуваннях конденсаторів різного призначення. Ці випадки супроводжувалися серйозними наслідками для потерпілих, а один з них мав навіть смертельний результат. Смерть була викликана випадковим дотиком до відключеного електричного фільтра, до складу якого входили конденсатори ємністю 37 мкФ і 12,5 мкФ та заряджені до напруги не більше 1000 В [27].

Ємність конденсатора і його напруга є важливими, але не єдиними чинниками, що визначають небезпеку розряду для людського організму. Наслідки розряду, як і в інших випадках ураження електричним струмом, залежать від опору контактів між людським тілом і сусідніми ділянками розрядного кола та інших обставин.

З метою уникнення небезпечних наслідків схема з'єднань конденсаторної установки повинна забезпечувати автоматичний розряд конденсаторів зразу ж після їх відключення. Можливі випадки, коли за наявності розрядних пристроїв конденсатори в батареї все ж залишаються зарядженими протягом

тривалого часу після їх відключення. Це може статися не тільки при випадковому обриві в колі розрядних пристроїв, але і при спрацьовуванні запобіжників для групового чи індивідуального захисту конденсаторів. Тому, щоб уникнути дотику до заряджених конденсаторів, при обслуговуванні конденсаторної установки необхідно виконувати такі вимоги в доповнення до загальних вимог з техніки безпеки.

Перед початком будь-якої роботи, при якій можливий дотик до струмопровідних частин відключеною конденсаторної установки, повинен бути проведений контрольний розряд конденсаторів. У батареях з індивідуальним захистом конденсаторів проводиться розряд кожного конденсатора в окремо, при груповому захисті - розряд кожної групи і при одній тільки спільному захисті - розряд всієї батареї в цілому [28].

При індивідуальному захисті розряд кожного конденсатора здійснюється шляхом замикання його затискачів за допомогою заземленого металевого стержня розрядної штанги. При груповому і одному тільки спільному захисті замикаються накоротко за допомогою того ж стержня відповідні струмопровідні шини в ошиновці батареї (після запобіжників).

Поява іскри при замиканні вказує на те, що конденсатор був заряджений. В цьому випадку замикання має тривати кілька секунд не тільки для зниження напруги до нуля, але і щоб уникнути появи залишкового заряду на затискачах конденсатора після розмикання розрядного кола.

Контрольний розряд конденсаторів необхідно проводити як при окремих розрядних опорах, так і при розряді батареї на обмотки силового трансформатора або двигуна, а також при розрядних опорах, підключених до затискачів конденсатора або вбудованих всередину конденсаторного бака.

Контрольний розряд ємності між затискачами і баком конденсатора можна вважати зайвим, так як ця ємність дуже мала. Незалежно від цього розряд ємності між затискачами конденсатора за допомогою заземленого стержня розрядної штанги є одночасно розрядом ємності між затискачами і заземленим баком конденсатора. Розміри розрядної штанги повинні бути однаковими з розмірами ізолюючої штанги для оперативних перемикачів в

установках тієї ж напруги, що і конденсаторна установка. Металевий стержень штанги повинен мати поперечний переріз не менше  $25 \text{ мм}^2$  [29].

Згідно з Правилами технічної експлуатації зміна патронів, які спрацювали, або несправних запобіжників повинна проводитися при знятій з конденсаторної установки напрузі після контрольного розряду відключених конденсаторів [27].

Крім перерахованих вище вимог, що ставляться до повсякденного обслуговування конденсаторних установок, необхідно дотримуватися додаткових вимог з техніки безпеки при випробуваннях конденсаторів. Якщо конденсатор піддається випробуванню підвищеною напругою через кенотронний апарат, то після закінчення випробування він залишається зарядженим до напруги, що в кілька разів перевищує його номінальну напругу. Тому необхідно розряджати випробуваний конденсатор на будь-який опір, підібраний в залежності від напруги конденсатора, який розряджається. Ця вимога аналогічна до вимогу про розрядку силового кабелю після випробування підвищеною напругою.

Для розряду конденсаторів після випробувань можна використовувати ті ж види електрообладнання, які застосовуються в якості постійно встановлених розрядних опорів, але з урахуванням наявності на конденсаторі підвищеної напруги проти номінальної. Розряд конденсаторів великої ємності, заряджених до напруги в кілька сотень вольт, зручно робити на вольтметр, так як при цьому можна спостерігати за приладом поступове зниження напруги на затискачах конденсатора, який розряджається. При будь-якій номінальній напрузі не слід здійснювати розряд конденсаторів після випробування підвищеною напругою шляхом замикання їх накоротко.

Як зазначено в [15], при індивідуальній компенсації асинхронних двигунів може спостерігатися при певних умовах самозбудження двигунів, що представляє небезпеку для обслуговуючого персоналу. Ці умови зустрічаються тільки в невеликій частини установок, але для більшої безпеки слід попередити обслуговуючий персонал про можливість наявності напруги на

затискачах відключеного двигуна з індивідуальною компенсацією протягом всього часу, поки двигун продовжує обертатися після відключення.

При експлуатації конденсаторів, просочених хлорованим дифенілом, слід враховувати його токсичні властивості [30]. Якщо виявлено просочування хлорованого дифенілу крізь нещільності бака конденсатора, то при будь-якій роботі з останнім не потрібно торкатися руками обличчя і не приймати їжі, а після закінчення роботи ретельно вимити руки з милом.

## **4.2 Захист персоналу у діючих електроустановках**

Щодо заходів безпеки, які передбачені в діючих електроустановках, зокрема, на повітряних і кабельних лініях електропередачі при проведенні ремонтних, монтажних, налагоджувальних, будівельних і інші робіт, можна розділити на 3 категорії: робота під напругою, робота без зняття напруги, робота зі зняттям напруги [26].

При виконанні робіт з частковим включенням обладнання електро-монтажнику забороняється наближатися самому і наближати інструмент та прилади, з якими він працює, до струмопровідних частин під напругою на відстань, яка є меншою за вказану в табл. 4.2, де приведено найменшу допустиму відстань виробничих працівників і використовуваних ними інструментів та приладів від тимчасових огорож до струмопровідних частин під час виконання робіт під напругою. Виконання робіт зі зняттям напруги здійснюється при повному або частковому відключенні електрообладнання.

На рис. 4.1 показано, як визначити відстані від людини, що виконує роботи в діючих установках, до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою вище 1000 В.



Таблиця 4.1- Безпечна відстань від струмопровідних частин

	Діюча напруга електрообладнання, кВ									
	до 1,0	3 ... 35	60 ... 110	150	220	330	400 ... 500	750	800 постій- ного струму	1150
Найменша допус- тима відстань, м	0,7	0,7	1,0	1,8	2,1	2,6	3,6	5,2	3,6	8,3

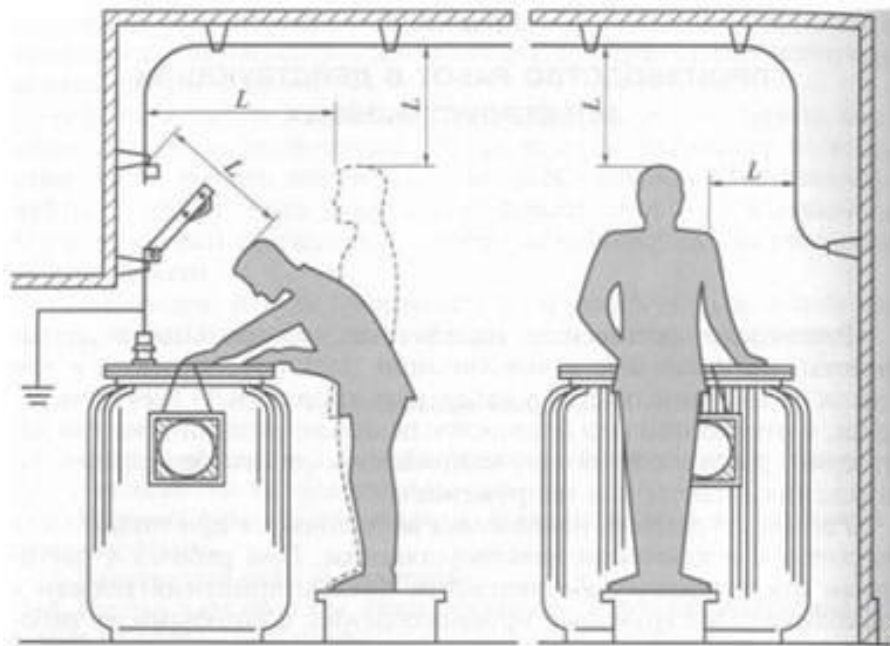


Рисунок 4.1 - Допустимі відстані від працівника до струмопровідних частин

Найменші допустимі відстані від людини до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою вище 1000 В напругою при виконанні робіт в діючій електроустановці приведені в табл. 4.1. При роботі поряд з неогородженими струмопровідними частинами, що знаходяться під напругою, в електроустановках напругою до 110 кВ забороняється знаходитися так, щоб ці частини були позаду чи з бічних сторін.

Роботи без зняття напруги проводяться без відключення будь-яких частин електрообладнання. В цьому випадку працювати можна за огороженнями струмопровідних частин постійними і тимчасовими, на корпусах обладнання, на основі оболонки кабелів, а також на відстанях від неогороджених струмопровідних частин під напругою, які приведені в табл. 4.1.

Роботи під напругою можна виконувати прямо на струмопровідних елементах із використанням електричних захисних засобів на відстанях, які зазначені в табл. 4.1. Електричні захисні засоби при виконанні цих робіт, призначені для захисту людини від струмопровідних частин, що є під напругою (діелектричні рукавички, кліщі, ізолюючі штанги), або від струму заземлення (діелектричні килими, галоші, спеціальні підставки, ізолюючі пристрою при роботах під напругою на повітряних лініях напругою вище 1000 В).

В електричних установках всі види робіт потрібно виконувати з обов'язковим дотриманням таких умов [32]:

- робота виконується з дозволу уповноваженої офіційної особи відповідно до завдання, яке оформлене у вигляді розпорядження або наряду-допуску;

- для забезпечення персоналу безпечних умов праці мають бути проведені організаційні і технічні заходи,

Наряд видається на основну частину робіт, які проводяться в електричних установках, беручи до уваги найбільш важливі, складні та тривалі. Наряди на повністю закінчені роботи зберігають протягом 30 діб в якості документі особливої важливості.

Розпорядження представляє собою усне або довільної форми письмове завдання на безпечне виконання роботи, в якому визначається її зміст, місце, заходи безпеки та особи, яким її виконання доручено. Роботи за розпорядженням є менш складними порівняно з роботами за нарядом, і зазвичай їх можна виконувати одноосібно.

Розпорядження, як правило, видається на не дуже складні або короточасні роботи тривалістю до 1 години та невідкладні роботи. Таке розпорядження має одноразовий характер, а термін його дії характеризується для виконавців тривалістю робочого дня. З метою забезпечення нормальної організації проведення робіт для запобігання нещасних випадків при активній продуктивності праці і якісному виконанню робіт визначають такі організаційні заходи:

- призначення осіб, що відповідають за безпечне виконання робіт;
- організація нарядів або розпоряджень на виконання робіт;
- допущення працівників до роботи;
- контроль за дотриманням працівниками вимог безпеки;
- організація перериві в роботі та її завершення.

Крім зазначених організаційних заходів необхідним є також проведення технічних заходів, а саме:

- виконання необхідних відключень та організація заходів з метою перешкоджання помилковому включенню комутаційного обладнання;
- контроль відсутності напруги на незадіяних струмопровідних елементах;
- переносні плакати безпеки, встановлення тимчасових огорож;
- встановлення тимчасових заземлень на недіюче струмопровідне обладнання.

Технічні заходи повинні забезпечити безпеку персоналу під час виконання робіт з повним або частковим зняттям напруги з електричної установки [33].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було вирішено актуальну наукову задачу, зокрема, на основі узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень розроблена методологія компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах, реалізація якої дозволяє вирішити прикладну проблему підвищення якості електричної енергії та зниження електроспоживання. Основні результати виконаних досліджень полягають в наступному.

1. Проведено аналіз потужності електричної енергії в залежності від передачі реактивної потужності елементами електропостачання промпідприємства.

2. З метою зниження вивантаження технологічного електрообладнання необхідний цілеспрямований взаємозв'язок регулювання режиму реактивної потужності та напруги в системі електропостачання промислового підприємства для досягнення зниження електроспоживання та підвищення ефективності застосування джерел реактивної потужності.

3. Для вимірювальної частини системи управління конденсаторним пристроєм розроблено його математичну модель, що дозволяє визначити амплітуду будь якого синусоїдального сигналу. Математичну модель пристрою реалізовано в програмному пакеті MATLAB з використанням додатка Simulink.

4. Розроблено метод управління потужністю батареї статичних конденсаторів, що дозволяє зменшити режими недокомпенсації і перекомпенсації в окремих фазах при несиметричному навантаженні.

5. Розроблений метод управління режимом реактивної потужності вузла навантаження, застосування якого дозволяє керувати режимом реактивної потужності на промисловому підприємстві, використовуючи значення реактивної потужності для кожного з джерел реактивної енергії, при яких витрати на реактивну потужність в розподільній мережі 0,4 кВ і її елементах будуть мінімальними.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності».
2. П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії / Вінниця: ВНТУ, 2018. – 174 с. ISBN 978-966-641-353-9.
3. Шкрабець Ф.П. Класифікація і структура втрат електроенергії / Ф.П. Шкрабець, Ю.В. Куваєв, Д.В. Ципленков, П.Ю. Красовський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(32). – 2005
4. Журахівський, А. В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навч. посібник для вузів / А. В. Журахівський, І. В. Жежеленко ; Держ. ун-т "Львівська політехніка"; ПДТУ. КАф. електропостачання пром. підприємств .. - Львів ; Маріуполь : [б. и.], 2000. - 109 с.
5. Методичні рекомендації визначення технологічних втрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередачі [Електронний ресурс]. – К.: Міненерговугілля України, 2013. – Режим доступу: [http://www.leonorm.com/p/NL\\_DOC/UA/201301/Nak399.htm](http://www.leonorm.com/p/NL_DOC/UA/201301/Nak399.htm)
6. Красовський Ю.Л., Кулик В.В., Лежнюк П.Д. Керування втратами електроенергії в розподільних мережах з використанням засобів АСКОЕ // Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського господ.- 2003.- вип. 19. т.1.- С. 99-107.
7. Оробчук Б., Харевич В. Задачі компенсації реактивної потужності в міських розподільних електромережах. - Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль, 2018, С. 46-47.
8. Осташевський М. О. О 76 Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с. ISBN 978-617-7541-11-9

9. Оробчук Б., Гудзь В. Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання // Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут».- Бережани, 2016 р.
10. Автоматизований комплекс визначення показників якості електроенергії / В.О. Мандзій, С.М. Бабюк, І.М. Сисак, В.В. Липницький. // Метрологія та прилади. – 2011. – №1. – С. 34–38.
11. Оробчук Б., Іванків А. Адаптивна система керування режимами електропостачання // Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут». - Бережани, 2016 р.
12. Попов В.В. Розробка методу вибору пристроїв компенсації реактивної потужності за умови мінімальних зведених витрат / В.В. Попов. Д.І. Комаричина // Електротехніка та електроенергетика: науковий журнал. – Запоріжжя. 2013. – Вип. 1. – С.77 – 82.
13. Електричні мережі та системи: підручник [для студентів електроенергет. спец. ВНЗ, аспірантів, викл. і спеціалістів відповід. профілю] / М. С. Сегеда ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — 3-тє вид, переробл. та доповн. — Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. — 540 с.
14. Оробчук Б., Вішталъ А. Автоматичний регулятор компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах. - Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 28-29 листопада 2018
15. Грабко В.В., Боцула М.П. Методи та інформаційно-вимірювальні системи для технічної діагностики силових косинусних конденсаторів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 144 с.
16. Сегеда М.С., Дончик В.В. Компенсація реактивної потужності в електричних мережах зі змінним навантаженням. Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів, 2000. № 400. С. 131-134.
17. ГНД 34.09.204-2004. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження / М-во палива та

енергетики України. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2004

18. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. Спосіб регулювання напруги в електричних мережах // IV Міжнар. наукової конференції “Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств” (PQ 2000). – 2000. – С.153.

19. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18

20. Ю.Н. Хижняков. Формування вектора напруги на шинах автономної електростанції. Вісник ТПУ, Т.315, № 4, 2009. - С.43-46.

21. Аладьєв В.З., Богдавічюс М.А. Maple 6: Розв’язок математичних статистичних і фізико-технічних задач – К.: Наукова думка, 2011 г. - 824 с., іл.

22. Арсеньєва С.І. Використання програмних засобів MATLAB для розв’язання типових задач аналогової автоматизації: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / С.І. Арсеньєва – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 118 с. ISBN 978-617-529-244-0

23. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок / Л.М. Бурбело., М.В. Кузьменко., О.О. Бірюков., О.М. Кінзерська // Вісн. ВПІ. – 2008. – № 5 . – С. 35–38

24. Оробчук Б., Гудзь В. Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання // Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут».- Бережани, 2016 р.

25. Лапін В.М., Безпека життєдіяльності людини, - Львів: ЛБК НБУ; Київ: Знання, 2000.-188 с.

26. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.

27. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Із змінами і доповненнями, внесеними наказами Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13 лютого 2012 року N 91, від 16 листопада 2012 року N 905, від 16 травня 2013 року N 273.
28. Норми випробування електрообладнання. Офіційне видання. Міністерство палива та енергетики України / Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – Київ, 2007.
29. Правила улаштування електроустановок, видання третє перероблене та доповнене. Київ, Мінпаливенерго України, 2012, 736 с.
30. Ткачук К.Н., Зацарний В.В., Третьякова Л.Д., Мітюк Л.О. Охорона праці і промислова безпека: навчальний посібник. Київ: Лібра, 2010. - 425 с.
31. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів // За ред. д.т.н., проф. М.П. Гандзюка - К.: Каравела, 2003. - 408 с.
32. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
33. Оробчук Б.Я., Буняк О.А., Бабюк С.М., Сисак І.М., Вакуленко О.О. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення дипломної роботи за ступенем «магістр». Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 р.



## Додаток А

Диференціальні рівняння синхронного компенсатора, пасивного активно-індуктивного навантаження та асинхронного навантаження:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{d1}}{d\omega_0 t} &= \frac{x_{ad}}{\alpha \gamma x_{\sigma s}} \Psi_{\alpha 1} + \frac{x_f}{\alpha \gamma x_{\sigma f}} \Psi_{f1} + \frac{1}{\gamma} \left( \frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s \right) i_{nd} + \\ & \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sd} + \frac{r_s K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rd} - \frac{x_{\sigma s} K_r}{\sigma x_s} [\Psi_{rq} \omega]; \\ \frac{d\Psi_{q1}}{d\omega_0 t} &= \Psi_{d1} - \frac{x_{aq}}{\beta \gamma x_{\sigma s}} \Psi_{q1} - \frac{1}{\gamma} \left( \frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s \right) i_{nq} + \frac{x_{\sigma s} K_r}{\gamma \sigma x_s} [\Psi_{rd} \omega] - \\ & - \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sq} - \frac{K_r r_s - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r - K_{\sigma s} K_r \alpha_r^1}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rq}; \\ \frac{dU_f}{d\omega_0 t} &= \frac{K_\Phi}{T_B} F - \frac{1}{T_B} U_f; \\ \frac{di_{nd}}{d\omega_0 t} &= \frac{x_{ad}}{\alpha \gamma x_{\sigma s}} \Psi_{d1} + \frac{x_f}{\alpha \gamma x_{\sigma f}} \Psi_{f1} + \left[ \frac{1}{\gamma} \left( \frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s \right) - \frac{r_n}{x_n} \right] i_{nd} + i_{nd} + \frac{x_{\sigma s} K_r}{\gamma \sigma x_s} [\Psi_{rq} \omega] + \\ & + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sd} + \frac{r_s K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rd}; \\ \frac{di_{nq}}{d\omega_0 t} &= \frac{x_{aq}}{\beta \gamma x_{\sigma s}} \Psi_{q1} + \left[ \frac{1}{\gamma} \left( \frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s \right) - \frac{r_n}{x_n} \right] i_{nq} - i_{nd} + \\ & + \frac{x_{\sigma s} K_r}{\gamma \sigma x_s} [\Psi_{rd} \omega] + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sq} + \frac{r_s K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r - x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{sd}}{d\omega_0 t} &= \frac{U_{\text{ОГ}}}{\gamma U_{\text{ОДБ}}} \left\{ \frac{x_{ad}}{\alpha x_{\sigma s}} \Psi_{\alpha 1} + \frac{x_f}{\alpha x_{\sigma f}} \Psi_{f1} + \left( \frac{x_{\sigma s}}{x_n} - r_n \right) i_{nd} + \right. \\ & + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\sigma x_s} \Psi_{sd} + \frac{r_s K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r - x_{\sigma s} \alpha_r^1 K_r}{\sigma x_s} \Psi_{rd} + \\ & \left. - \frac{x_{\sigma s} K_r}{\sigma x_s} [\Psi_{rq} \omega] \right\} + \Psi_{sq} - \alpha_s^1 \Psi_{sd} + \alpha_s^1 K_s \Psi_{rd}; \\ \frac{d\Psi_{sq}}{d\omega_0 t} &= \frac{U_{\text{ОГ}}}{\gamma U_{\text{ОДБ}}} \left\{ \frac{x_{aq}}{\beta x_{\sigma s}} \Psi_{q1} + \left( \frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s \right) i_{nq} + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1 K_s + x_{\sigma s} \alpha_s^1 - r_s}{\sigma x_s} \Psi_{sq} + \right. \\ & \left. + \frac{x_{\sigma s} K_r}{\sigma x_s} [\Psi_{rd} \omega] + \frac{r_s K_r - x_{\sigma s} \alpha_s^1 K_r - x_{\sigma s} K_r \alpha_r^1}{\sigma x_s} \Psi_{rq} \right\} - \Psi_{sd} - \alpha_s^1 \Psi_{sq} + \alpha_s^1 K_s \Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{d\omega_0 t} &= -\alpha_r^1 \Psi_{rd} + \Psi_{rq} - [\omega \Psi_{rq}] + \alpha_r^1 K_r \Psi_{sd}; \\ \frac{d\Psi_{rq}}{d\omega_0 t} &= -\alpha_r^1 \Psi_{rq} - \Psi_{rd} + [\omega \Psi_{rd}] + \alpha_r^1 K_s \Psi_{sq}; \\ \frac{d\omega}{d\omega_0 t} &= \frac{3p^2 K_r U_{\text{ОДБ}}^2}{2x_{\text{Саѳс}} \sigma \omega_0^3 J} (\Psi_{rd} \Psi_{sq} - \Psi_{sd} \Psi_{rq}) - \frac{p}{J \omega_0^2} M_c; \end{aligned}$$

$$U_d = \frac{x_{ad}}{\alpha x_{\sigma s} \gamma} \Psi_{d1} + \frac{x_f}{\alpha x_{\sigma f} \gamma} \Psi_{f1} + \frac{x_1 d}{\alpha x_{\sigma 1d} \gamma} (\Psi_{1d1} +$$

$$\frac{1}{\gamma} (\frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s) i_{nd} + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r K_s + x_{\sigma s} \alpha_s - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sd} +$$

$$+ \frac{-r_s K_r + x_{\sigma s} \alpha_s K_r + x_{\sigma s} \alpha_r K_r}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rd} - \frac{x_{\sigma s} K_r}{\gamma \sigma x_s} [\Psi_{rq} \omega];$$

$$U_q = \frac{x_{aq}}{\beta x_{\sigma s} \gamma} \Psi_{q1} + \frac{x_1 q}{\beta x_{\sigma 1q} \gamma} \Psi_{1q1} +$$

$$+ \frac{1}{\gamma} (\frac{x_{\sigma s} r_n}{x_n} - r_s) i_{nq} + \frac{x_{\sigma s} K_r \alpha_r K_s + x_{\sigma s} \alpha_s - r_s}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{sq} -$$

$$- \frac{-r_s K_r + x_{\sigma s} \alpha_s K_r + x_{\sigma s} \alpha_r K_r}{\gamma \sigma x_s} \Psi_{rq} - \frac{x_{\sigma s} K_r}{\gamma \sigma x_s} [\Psi_{rd} \omega],$$

$$\text{де } \gamma = 1 + \frac{x_{\sigma s}}{x_n} + \frac{x_{\sigma s} U_{0r}}{\sigma x_s U_{0ДВ}};$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2};$$

$\Psi_{d1}, \Psi_{q1}, \Psi_{f1}, \Psi_{1d1}, \Psi_{1q1}$  - проекції потокозчеплень статора, обмотки збудження

синхронного компенсатора в аномальній системі відносних одиниць по осях  $d$  і  $q$ ;

$U_d, U_q$  - проекції напруги на шинах вузла навантаження по осях  $d$  і  $q$ ;

$i_{nd}, i_{nq}$  - проекції струму пасивного навантаження у системі відносних одиниць статора по осях  $d$  і  $q$ ;

$\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$  - проекції потокозчеплень статора та ротора асинхронного двигуна у системі відносних одиниць статора в осях  $d$  і  $q$ ;

$\omega$  - частота обертання ротора асинхронного двигуна;

$\omega_0 t$  - синхронний час, рад.;

$\omega_0 = 3,14$  - кутова частота, рад/с;

$x_{ad}, x_{aq}, x_f, x_{\sigma s}, x_{\sigma f}, x_{\sigma 1d}, x_{\sigma 1q}, T_{d0}, T_B, r_s, \alpha, \beta$  - параметри синхронного компенсатора;

$K_\Phi$  - коефіцієнт форсування;

$F_1, F_2$  - вихід нечіткого регулятора;

$U_{ог}, U_{одв}$  - базова напруга статора синхронного компенсатора і статора асинхронного двигуна;

$r_{sДВ}, r_{rДВ}$  - активні опори статора і ротора асинхронного двигуна;

$x_s, x_r$  - повні індуктивні опори статора і ротора;

$x_m$  - індуктивний опір головного потоку асинхронного двигуна;

$x_{Sabc}$  - повний індуктивний опір статора асинхронного двигуна;

$\alpha_s^1 = \frac{r_{sДВ}}{\sigma x_s}$  - коефіцієнт затухання статора асинхронного двигуна;

$\alpha_r^1 = \frac{r_{rДВ}}{\sigma x_r}$  - коефіцієнт затухання ротора асинхронного двигуна;

$\sigma = 1 - K_s K_r$  - коефіцієнт розсіювання за Блонделем;

$K_s = \frac{x_m}{x_s}$  - коефіцієнт електромагнітного зв'язку статора асинхронного двигуна;

$K_r = \frac{x_m}{x_r}$  - коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора асинхронного двигуна;

$M_c$  - реактивний момент опору;

$J$  - момент інерції, кг·м<sup>2</sup>;

$P$  - число пар полюсів;

$F$  - керування струмом збудження синхронного компенсатора.