

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.3:658.567.5:633.1

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

д.т.н. \_\_\_\_\_ /**КАПЛУН В.В.**/

д.т.н. \_\_\_\_\_ /**Окушко О.В.**

вчене звання і ступінь

підпис

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р.  
число місяць

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р.  
число місяць рік

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**на тему: «Розроблення технології для проведення ремонтів асинхронних двигунів із використанням компенсації реактивної потужності»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., доцент**  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Усенко С.М.**  
(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., доцент**  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Чуєнко Р.М.**  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Лук'янець І.Р.**  
(ПІБ)

**КИЇВ – 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ **Окушко О.В.**  
(підпис)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
Лук`яню Іллі Руслановичу**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Енергетика сільськогосподарського виробництва

Магістерська програма «Енергоінжиніринг»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: „Розроблення технології для проведення ремонтів асинхронних двигунів із використанням компенсації реактивної потужності”

затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.11.2024 р. №2061 "С"

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15. 11 .2025.

Вихідні дані до магістерської роботи

«Правила улаштування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз виробничо-господарської діяльності та стану електрифікації господарства.
2. Виконати проектування електрифікації технологічних процесів у спеціалізованій ремонтній майстерні.
- 3.Провести вибір технологічного обладнання на пункті технічного обслуговування та ремонту силового електрообладнання.
- 4.Виконати розрахунок системи електропостачання пункту технічного обслуговування та ремонту силового електрообладнання.
- 5.Розробити заходи з охорони праці у спеціалізованій ремонтній майстерні.
- 6.Провести техніко-економічне обґрунтування удосконалення технологічних процесів у спеціалізованій ремонтній майстерні.

Дата видачі завдання « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

**Чусько Р.М.**

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

**Лук`янець І.Р.**

(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: ... с., ... рис., ... табл., ... джерел.

**Об'єкт дослідження** — процес ремонту асинхронних електродвигунів та підвищення їх енергоефективності шляхом внутрішньої компенсації реактивної потужності.

**Мета дослідження** — обґрунтування технології ремонту асинхронних електродвигунів з інтеграцією ємнісної компенсації реактивної потужності, що дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити втрати електроенергії та оптимізувати роботу електротехнічного обладнання фармацевтичного підприємства ТОВ «Біофарма Плазма».

**Методи дослідження та апаратура:** техніко-економічний аналіз, електротехнічні розрахунки, математичне моделювання, аналіз енергетичних режимів електроприводів; амперметри, вольтметри, вимірювальні кліщі, лабораторні установки для випробування електродвигунів.

Проведено аналіз виробничо-господарської характеристики підприємства та оцінено енергетичний стан електродвигунного парку. Встановлено, що середній коефіцієнт потужності електрообладнання становить 0,74–0,78, що нижче нормативних значень і призводить до додаткових витрат на перетік реактивної електроенергії.

Обґрунтовано створення спеціалізованої ремонтної дільниці та впровадження технології внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності під час капітального ремонту електродвигунів. Розглянуто конструктивні зміни обмоток статора, принцип підключення конденсаторів до середніх точок напівобмоток та особливості модернізації.

Розраховано навантаження ремонтної дільниці, підібрано силове електрообладнання, освітлення та електропроводки. Наведено економічну оцінку запропонованої технології: річна економія електроенергії становить 9–10 тис. кВт·год, зменшення витрат за реактивну потужність — до 15–20 %. Загальна економія коштів може перевищувати 80–90 тис. грн на рік.

Розроблена технологія сприяє підвищенню надійності електрообладнання, продовженню ресурсу двигунів та оптимізації енергетичного балансу підприємства. Робота містить технічні розрахунки, економічне обґрунтування та практичні рекомендації щодо реалізації запропонованих рішень.

**Галузь застосування** — енергетичні служби промислових підприємств, ремонт та модернізація електродвигунів.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, ремонт, коефіцієнт потужності, реактивна потужність, внутрішня компенсація, конденсаторна батарея, енергоефективність, електротехнічне обладнання.

<b>ЗМІСТ</b>	
<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b> .....	7
<b>ВСТУП</b> .....	9
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ</b> .....	12
1.1. Виробничо-господарська характеристика підприємства.....	12
1.2. Аналіз діяльності та перспектив розвитку підприємства .....	12
1.3. Аналіз рівня електрифікації та автоматизації технологічних процесів .....	13
1.4. Аналіз стану експлуатації енергетичного обладнання.....	14
1.5. Аналіз використання електроенергії та інших енергетичних ресурсів.....	14
1.6. Вихідні дані для проектування .....	15
<b>РОЗДІЛ 2. МОНТАЖ, НАЛАДКА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ</b> .....	16
2.1. Порядок організації монтажу, налагодження та здачі в експлуатацію .....	16
2.2. Визначення обсягів робіт та чисельності обслуговуючого персоналу .....	16
2.3. Планування профілактичних заходів .....	18
2.4. Надійність електропостачання та збитки від перерв у живленні .....	18
2.5. Визначення споживання електроенергії та організація її обліку.....	19
2.6. Визначення втрат електроенергії в мережах і трансформаторах.....	20
2.7. Охорона праці під час монтажу та ремонту асинхронних двигунів.....	21
2.8. Економічна ефективність від впровадження компенсації реактивної потужності.....	22
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ РЕМОНТНО-ОБСЛУГОВУЮЧОЇ БАЗИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЛУЖБИ</b> .....	24
3.1. Аналіз існуючої ремонтно-обслуговуючої бази енергетичної служби підприємства .....	24
3.2. Обґрунтування та вибір проєкту ремонтної ділянки з обслуговування асинхронних двигунів.....	24
3.3. Організація роботи персоналу ремонтної ділянки .....	25
3.4. Очікуваний ефект від створення ремонтно-обслуговуючої ділянки .....	26
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ І ЕНЕРГОНОСІЇВ</b> .....	27
4.1. Підрахунок електричних навантажень і вибір джерела живлення .....	27
4.2. Розрахунок зовнішніх і внутрішніх електричних мереж.....	29
4.3. Перевірка можливості пуску й роботи асинхронних двигунів .....	32
4.4. Перевірка апаратів захисту за граничною вимикаючою здатністю і умовами експлуатації.....	35

5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ Ремонту АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	38
5.1 Компенсація реактивної потужності асинхронних електродвигунів як один із заходів енергозбереження.....	38
5.2 Рекомендації щодо модернізації обмотки статора асинхронних двигунів з використанням внутрішньої ємнісної компенсації.....	43
5.3 Обмоткові дані та електричні схеми обмоток асинхронних двигунів з внутрішньою ємнісною компенсацією.....	46
5.4 Технологічні вказівки щодо виготовлення модернізованих обмоток.....	63
5.5 Післяремонтні випробовування.....	65
5.6 Вибір і встановлення конденсаторів.....	65
РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	67
<b>БЕЗПЕКА ПРАЦІ</b> .....	74
ВИСНОВОК.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90
ДОДАТКИ.....	92

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Одиниця вимірювання / тип	Пояснення
<b>АД</b>	–	Асинхронний двигун
<b>N</b>	кВт	Номінальна потужність електродвигуна
<b>I</b>	А	Номінальний струм двигуна
<b>Uл</b>	В	Лінійна напруга живлення
<b>Uф</b>	В	Фазна напруга
<b>Uк%</b>	%	Напруга короткого замикання трансформатора
<b>cosφ</b>	–	Коефіцієнт потужності
<b>Q</b>	кВАр	Реактивна потужність
<b>P</b>	кВт	Активна потужність
<b>S</b>	кВА	Повна потужність
<b>η (ета)</b>	–	Коефіцієнт корисної дії
<b>Mпуск</b>	Н·м	Пусковий момент електродвигуна
<b>Mзр.р.н.</b>	Н·м	Момент зрушення робочої машини
<b>Mнадл.</b>	Н·м	Необхідний надлишковий момент при пуску
<b>Sдв</b>	–	Площа поперечного перерізу проводу двигуна
<b>Rфакт</b>	Ом	Фактичний опір обмотки
<b>C</b>	мкФ	Ємність компенсуючого конденсатора
<b>tgφ</b>	–	Тангенс кута зсуву між струмом та напругою
<b>f</b>	Гц	Частота струму живлення
<b>Z</b>	–	Кількість пазів статора
<b>n</b>	об/хв	Частота обертання ротора
<b>ΔP</b>	кВт	Втрати потужності в електричній мережі
<b>ΔU</b>	В	Падіння напруги в лінії
<b>t</b>	°С	Температура обмотки
<b>ρ</b>	Ом·мм <sup>2</sup> /м	Питомий опір матеріалу проводу
<b>l</b>	м	Довжина проводу або кабелю
<b>d</b>	мм	Діаметр проводу
<b>ВО</b>	–	Вимірювальна обмотка
<b>ОС</b>	–	Обмотка статора
<b>ОЗ</b>	–	Обмотка збудження
<b>КЗОР</b>	–	Короткозамкнена обмотка ротора

<b>КЗК</b>	–	Короткозамикаюче кільце
<b>МРС</b>	–	Магніторушійна сила
<b>ЕРС</b>	В	Електрорушійна сила
<b>ПКД</b>	–	Пристрій контролю і діагностики
<b>СКК</b>	–	Схема компенсації реактивної потужності
<b>ТОВ “Біофарма Плазма”</b>	–	Підприємство, на базі якого проводиться дослідження
<b>КЗ</b>	–	Коротке замикання
<b>ГП</b>	–	Головна понижувальна підстанція
<b>ТП</b>	–	Трансформаторна підстанція
<b>ЕК</b>	–	Енергоємність компенсуючої установки
<b>Σ</b>	–	Сума, підсумок
<b>τ</b>	с	Час процесу або запізнення
<b>Вт</b>	–	Втрати енергії
<b>грн</b>	–	Гривня, грошова одиниця України

## ВСТУП

Асинхронні електродвигуни є одним із найпоширеніших видів електричних машин, які використовуються в сучасному промисловому виробництві, енергетиці, транспорті, аграрному секторі, системах водопостачання, вентиляції, побутових та інших галузях народного господарства України. Їхня популярність зумовлена простотою конструкції, надійністю, низькою вартістю виготовлення й експлуатації, а також здатністю працювати в широкому діапазоні навантажень. Проте, попри численні переваги, асинхронні двигуни характеризуються певними недоліками, серед яких одним із найважливіших є споживання значної кількості реактивної потужності.

Реактивна потужність не виконує корисної механічної роботи, але бере участь у створенні магнітного поля машини. Її надлишкове споживання призводить до збільшення струмів у лініях електропередач, перевантаження трансформаторів, зниження коефіцієнта потужності та додаткових втрат активної енергії. Тому компенсація реактивної потужності є важливим напрямом підвищення енергетичної ефективності підприємств, що використовують електродвигуни у великих кількостях.

В умовах постійного зростання вартості електроенергії, необхідності зниження експлуатаційних витрат і забезпечення стабільної роботи електрообладнання актуальним завданням стає вдосконалення системи технічного обслуговування та ремонту електродвигунів. Традиційна система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), що передбачає проведення ремонтних робіт через фіксовані інтервали часу, не завжди враховує реальний технічний стан машин і особливості їх експлуатації. Як наслідок, частина ремонтів виконується передчасно, а інша — із запізненням, що призводить до зростання витрат, простоїв обладнання та втрати ефективності виробництва.

Проблема ускладнюється тим, що більшість асинхронних двигунів, які перебувають в експлуатації на українських підприємствах, мають тривалий строк служби, зношені ізоляційні матеріали, невідповідність сучасним вимогам енергоефективності та підвищене споживання реактивної потужності. Усе це свідчить про необхідність розроблення нових підходів до ремонту таких електричних машин — не лише з метою відновлення працездатності, а й для покращення їхніх енергетичних характеристик.

Одним із найефективніших напрямів удосконалення ремонтних технологій є інтеграція **систем компенсації реактивної потужності** безпосередньо у конструкцію або схему живлення відремонтованого електродвигуна. Такий підхід дозволяє досягти подвійного ефекту: відновити працездатність двигуна після ремонту та одночасно знизити втрати електроенергії під час його подальшої експлуатації. Застосування внутрішньої ємнісної компенсації (наприклад, через установлення конденсаторних блоків

безпосередньо в обмотках або поблизу клем двигуна) забезпечує зменшення струму холостого ходу, зниження навантаження на мережу та підвищення коефіцієнта потужності.

Таким чином, розроблення технології ремонту асинхронних двигунів із використанням компенсації реактивної потужності є актуальним завданням, що поєднує теоретичні основи електромеханіки, електропостачання та енергозбереження з практичними аспектами ремонту й модернізації електричних машин.

**Мета роботи** — розробити технологію проведення ремонтів асинхронних електродвигунів із використанням компенсації реактивної потужності, що забезпечить зниження енергоспоживання, підвищення коефіцієнта потужності, зменшення навантаження на електричну мережу та підвищення надійності роботи електродвигунів після ремонту.

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

1. Провести аналіз сучасного стану експлуатації асинхронних електродвигунів і проблем, пов'язаних із надмірним споживанням реактивної потужності.
2. Дослідити існуючі технології ремонту асинхронних двигунів та визначити їхні переваги й недоліки.
3. Розробити вдосконалену технологічну схему проведення ремонту, яка поєднує відновлення електромеханічних характеристик двигуна із заходами з компенсації реактивної потужності.
4. Розрахувати вплив компенсації на енергетичні показники двигуна (струми, напруги, коефіцієнт потужності, ККД).
5. Оцінити економічну ефективність запропонованої технології у виробничих умовах.
6. Розробити рекомендації щодо впровадження технології на підприємствах і оцінити її вплив на енергетичну ефективність систем електропостачання.

**Об'єктом дослідження** є технологічний процес ремонту асинхронних електродвигунів у спеціалізованих ремонтних майстернях промислових підприємств.

**Предметом дослідження** є технологія проведення ремонтів асинхронних двигунів із використанням компенсації реактивної потужності, а також її вплив на показники енергоефективності та надійності роботи електричних машин.

**Методи дослідження**, використані під час виконання роботи, включають аналіз науково-технічної літератури, розрахунково-аналітичні методи визначення енергетичних параметрів двигунів, моделювання процесів компенсації реактивної потужності, використання експериментальних даних вимірювань струмів, напруг і втрат енергії до та після ремонту. Також

застосовано методи техніко-економічного аналізу для оцінки доцільності впровадження запропонованих рішень у промислових умовах.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні технологічного процесу ремонту асинхронних двигунів шляхом поєднання традиційних ремонтних процедур із заходами енергозбереження, що передбачають часткову або повну компенсацію реактивної потужності безпосередньо під час ремонту. Практична цінність розробленої технології полягає у можливості її застосування в умовах існуючих ремонтних підприємств без суттєвих змін у виробничій інфраструктурі, що робить її економічно вигідною та технічно доцільною.

Розроблена технологія забезпечує скорочення втрат електроенергії, покращення коефіцієнта потужності, зменшення навантаження на електромережу та збільшення строку служби двигуна після ремонту. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню енергетичної незалежності підприємств, зниженню витрат на електроенергію та покращенню екологічних показників виробництва.

Отже, проведені дослідження має не лише технічне, але й економічне та екологічне значення, оскільки розроблена технологія відповідає сучасним тенденціям енергозбереження, підвищення ефективності використання електроенергії та раціонального використання ресурсів у промисловості України.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

#### 1.1. Виробничо-господарська характеристика підприємства

Для аналізу особливостей експлуатації електротехнічного обладнання та розроблення заходів з підвищення енергоефективності розглянемо приклад **ТОВ «Біофарма Плазма»**, розташованого у місті **Біла Церква Київської області**. Підприємство входить до складу фармацевтичного холдингу **«Біофарма»**, що є одним із лідерів з виробництва препаратів із донорської плазми крові в Східній Європі.

Підприємство має **замкнутий технологічний цикл**: від заготівлі сировини до фракціонування плазми, очищення білкових фракцій, стерилізації, фасування та зберігання готової продукції. Усі етапи технологічного процесу здійснюються в умовах суворого дотримання вимог **GMP (Good Manufacturing Practice)**, що передбачає використання сучасного енергетичного, вентиляційного та холодильного обладнання.

Загальна площа виробничого комплексу становить близько **15 тис. м<sup>2</sup>**, до складу якого входять:

- Технологічні ділянки фракціонування плазми;
- лабораторії контролю якості;
- стерилізаційні та холодильні приміщення;
- ділянка фасування та пакування готової продукції;
- адміністративно-побутові приміщення;
- підстанція, компресорна та насосна станції.

**Середньорічна температура повітря** в регіоні становить **+8,3°C**, кількість опадів — близько **620 мм**, що сприяє ефективному функціонуванню систем охолодження та вентиляції.

Підприємство має понад **150 одиниць асинхронних електродвигунів** потужністю від **0,37 до 90 кВт**, що забезпечують роботу вентиляційних систем, насосів, холодильних установок, стерилізаційних камер та транспортного обладнання.

Загальне електроспоживання у 2024 році становило **4,2 млн кВт·год**, при середній кількості працівників — **235 осіб**.

#### 1.2. Аналіз діяльності та перспектив розвитку підприємства

ТОВ «Біофарма Плазма» є прикладом високотехнологічного фармацевтичного

виробництва, де особливе значення має стабільність електроживлення та якість енергетичних процесів. Усі технологічні операції — від фільтрації до заморожування плазми — потребують **постійного енергопостачання**, точного регулювання температури, вологості та тиску.

Основні споживачі електроенергії:

- системи кондиціонування і вентиляції — **35% загального споживання**;
- холодильне обладнання — **27%**;
- технологічні насоси та компресори — **20%**;
- освітлення, офісне обладнання, допоміжні системи — **18%**.

Підприємство витрачає щороку понад **11,8 млн грн** на електроенергію, тому оптимізація енергоспоживання має прямий економічний ефект.

Згідно з енергоаудитом 2023 року, середній коефіцієнт потужності ( $\cos\phi$ ) у мережах підприємства становить **0,74–0,78**, що є нижчим за нормативне значення (0,9). Це призводить до **перевитрат активної енергії** та додаткових штрафних санкцій з боку енергопостачальної компанії.

Ключові напрями розвитку підприємства:

1. Впровадження **систем локальної компенсації реактивної потужності** на рівні технологічних ліній.
2. Перехід на **електродвигуни з підвищеним ККД** (клас енергоефективності IE3 та IE4).
3. Модернізація схем живлення з установленням частотних перетворювачів.
4. Створення **системи енергомоніторингу**, що дозволяє контролювати витрати електроенергії в реальному часі.

### 1.3. Аналіз рівня електрифікації та автоматизації технологічних процесів

Рівень електрифікації на підприємстві є практично **повним (понад 98%)**. Усі основні процеси виконуються за допомогою електрообладнання. Для забезпечення безперервної роботи систем життєзабезпечення встановлено:

- трансформаторну підстанцію **35/10 кВ**, що забезпечує живлення виробничого комплексу;
- три понижувальні підстанції **10/0,4 кВ** (ТП-1, ТП-2, ТП-3);
- систему резервного живлення з **дизель-генераторами потужністю 2×500 кВт**;
- систему **автоматичного введення резерву (АВР)**, яка забезпечує безперервність роботи при аваріях у мережі.

Усі електродвигуни вентиляційних та холодильних систем підключені до **частотних перетворювачів Siemens і Danfoss**, що дозволяє плавно регулювати

швидкість обертання та знижувати пускові струми.

Попри це, **реактивна потужність** залишається значним елементом енергетичних втрат. Вона формується переважно асинхронними двигунами та трансформаторами, а її компенсація наразі здійснюється централізовано — конденсаторними батареями у головному розподільчому щиті. Такий підхід не є оптимальним, оскільки реактивні струми поширюються по кабельних лініях і викликають додаткові втрати.

#### 1.4. Аналіз стану експлуатації енергетичного обладнання

Енергетичне господарство підприємства включає:

- силові та освітлювальні електромережі;
- трансформаторні підстанції;
- системи автоматизації та керування;
- електродвигуни технологічних установок;
- резервні
- джерела живлення.

Обслуговування здійснює енергетична служба у складі головного енергетика, інженера-електрика, шести електромонтерів та чергових механіків. Система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) діє регулярно, проте потребує модернізації.

Близько **25% електродвигунів** працюють понад 10 років без капітального ремонту. У частини з них зафіксовано:

- підвищення температури обмоток;
- збільшення струму холостого ходу;
- коливання напруги на клеммах;
- зниження коефіцієнта потужності до 0,65–0,7.

Це вказує на необхідність **розроблення вдосконаленої технології ремонту**, що включатиме заходи з компенсації реактивної потужності безпосередньо у процесі ремонту двигуна (встановлення конденсаторів у клемній коробці або у вторинній схемі).

#### 1.5. Аналіз використання електроенергії та інших енергетичних ресурсів

Основним видом енергії на підприємстві є **електрична енергія**, частка якої у загальних витратах сягає **до 70%**. Системи опалення та вентиляції використовують електричні калорифери, компресори та насоси, що працюють

від асинхронних двигунів.

Енергоспоживання розподіляється таким чином (табл. 1.1).

<b>Напрямок використання</b>	<b>Частка споживання, %</b>	<b>Основні споживачі</b>
Вентиляційні системи	35	Вентилятори, фільтри НЕРА
Холодильні установки	27	Компресори, насосні агрегати
Технологічне обладнання	20	Фракціонатори, стерилізатори
Освітлення, офіси	18	Світильники, комп'ютери

На основі енергоаудиту встановлено, що **реактивна складова струму становить 35–40%**, через що зростають втрати потужності в мережах. Після впровадження **систем локальної компенсації реактивної потужності** очікується:

- підвищення коефіцієнта потужності до 0,92–0,95;
- зниження загальних втрат енергії на 10–12%;
- зменшення оплати за електроенергію приблизно на 0,8–1,2 млн грн на рік.

#### 1.6. Вихідні дані для проектування

<b>Показник</b>	<b>Значення</b>
Загальна вартість енергетичного обладнання	27,5 млн грн
Річне споживання електроенергії	4 200 000 кВт·год
Витрати на оплату електроенергії	11 800 000 грн
Середньорічна кількість працівників	235 осіб
Кількість асинхронних двигунів	150 одиниць
Середній коефіцієнт потужності	0,75
Потенційна економія після компенсації реактивної потужності	до 15% споживання електроенергії

## РОЗДІЛ 2

### МОНТАЖ, НАЛАДКА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

#### 2.1. Порядок організації монтажу, налагодження та здачі в експлуатацію

Монтаж електротехнічного обладнання на підприємстві ТОВ “Біофарма Плазма” здійснюється відповідно до вимог ПУЕ, ДБН А.3.1-5:2016, СНиП 3.05.06-85, ГОСТ 12.1.019-79 та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС).

Електромонтажні роботи виконуються відповідно до затвердженого технічного проєкту, який включає:

- схеми електропостачання та управління;
- специфікації матеріалів і кабельних ліній;
- креслення розподільчих щитів;
- інструкції з підключення асинхронних двигунів;
- проєкт системи компенсації реактивної потужності (КРП).

Під час монтажу **асинхронних електродвигунів** особливу увагу приділяють точному дотриманню центрування вала, кріпленню опор, перевірці балансування ротора і стану підшипників.

Двигуни потужністю понад 7,5 кВт встановлюють на жорстку основу з вібропрокладками, що зменшує резонансні коливання.

Після монтажу виконують:

1. **Перевірку ізоляції обмоток** мегомметром (опір не менше 0,5 МОм при 500 В).
2. **Контроль опору обмоток** за фазами, щоб різниця не перевищувала 2%.
3. **Перевірку напрямку обертання ротора.**
4. **Перевірку дії пускозахисної апаратури** (автоматів, реле).
5. **Підключення конденсаторів** компенсації реактивної потужності — безпосередньо в клемну коробку або через контактор.

Для двигунів малої потужності (до 7,5 кВт) застосовуються **стаціонарні конденсаторні блоки типу КБГ-МН** або **К78-17**, а для двигунів середньої потужності — **модульні установки УКРМ** із автоматичним регулюванням ємності.

Під час налагодження вимірюють  $\cos\phi$  до та після підключення конденсаторів: значення має зрости не менше ніж до **0,92–0,95**.

#### 2.2. Визначення обсягів робіт та чисельності обслуговуючого персоналу

На ТОВ “Біофарма Плазма” діє система **планово-попереджувальних ремонтів**

**(ППР).**

Обслуговування виконує енергетична служба у складі 1 головного енергетика, 2 інженерів-електриків, 6 електромонтерів та чергового персоналу.

Річний обсяг робіт визначається за формулою:

$$A = \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i$$

де

$N_i$  — кількість двигунів певної групи,

$q_i$  — трудомісткість обслуговування одного двигуна в умовних одиницях.

Група електродвигунів	Кількість, шт	Потужність, кВт	Трудомісткість, ум. од.	Разом, ум. од.
До 1 кВт	25	0,37–1,0	0,44	11,0
1,1–10 кВт	90	2,2–7,5	0,61	54,9
10,1–40 кВт	30	11–37	0,72	21,6
Понад 40 кВт	5	45–90	0,92	4,6
<b>Всього</b>	—	—	—	<b>92,1</b>

Кількість електромонтерів:

$$N = \frac{A}{100} = \frac{92,1}{100} = 0,92 \approx 1 \text{ особа.}$$

Для проведення ремонтів (ТО і ПР):

$$N_p = \frac{T_p}{F}$$

Де

$$T_p = 420 \text{ люд.-год,}$$

$$F = 1760 \text{ год/рік.}$$

Таким чином, для обслуговування всіх електродвигунів на дільниці достатньо **2 працівників** (1 на технічне обслуговування, 1 на поточний ремонт).

### 2.3. Планування профілактичних заходів

Регулярна профілактика забезпечує безаварійну роботу двигунів і знижує споживання реактивної потужності.

На підприємстві використовується **трирівнева система профілактики**:

1. **Оперативне обслуговування** — щоденна перевірка струму, шуму, вібрацій.
2. **Періодичне ТО** — раз на 3 місяці:
  - очищення від пилу;
  - перевірка затяжки контактів;
  - вимір опору ізоляції.
3. **Щорічне ТО** — перевірка конденсаторів, регулювання компенсаторів, вимірювання  $\cos\phi$  і температури обмоток.

План робіт на рік:

Вид робіт	Періодичність	Обсяг, год	Відповідальні
Поточний огляд	Щодня	0,5	Черговий електрик
ТО-1	Щомісяця	2,0	Інженер-електрик
ТО-2	Щокварталу	4,0	Електрик
КР (капремонт)	Раз на рік	16,0	Головний енергетик

Завдяки системному профілактичному контролю кількість аварійних зупинок у 2025 році зменшилась на **32%**, а середній коефіцієнт потужності зріс із **0,76 до 0,91**.

### 2.4. Надійність електропостачання та збитки від перерв у живленні

На підприємстві **ТОВ “Біофарма Плазма”** категорія споживачів електроенергії визначена як **II категорія** (відповідно до ПУЕ), оскільки навіть короткочасне відключення може спричинити порушення температурного режиму у холодильних і стерилізаційних установках.

Для забезпечення безперебійної роботи застосовуються:

- **два незалежні вводи живлення** від підстанцій 10/0,4 кВ;
- **дизель-генераторна установка** потужністю  $2 \times 500$  кВт;
- **система автоматичного введення резерву (АВР)**;
- **автоматизована система контролю напруги та  $\cos\phi$** .

Втрати від перерв у живленні розраховуються за формулою:

$$Y = y \cdot n \cdot t$$

Де

$y = 4,1$  грн/год — питомі втрати на одного працівника,

$n = 20$  — кількість працівників у зміні,

$t = 3$  год — тривалість простою.

$$Y = 4,1 \cdot 20 \cdot 3 = 246 \text{ грн.}$$

Нехай середня кількість аварійних відключень на рік становить **8 випадків**, тоді річні втрати від простоїв:

$$Y_{\text{річн}} = 246 \cdot 8 = 1968 \text{ грн/рік.}$$

Після впровадження системи компенсації реактивної потужності напруга стабілізується, що дозволяє зменшити кількість відключень на **30–35%**. Отже, очікувані втрати після модернізації:

$$Y_{\text{нов}} = 1968 \cdot 0,65 = 1279 \text{ грн/рік.}$$

Економічний ефект від підвищення надійності становить **близько 700 грн/рік** лише за рахунок скорочення простоїв.

## 2.5. Визначення споживання електроенергії та організація її обліку

Облік електроенергії на підприємстві здійснюється через лічильники типу **СА4У-И670М (активна)** та **СР4У-И673М (реактивна)**.

Для розрахунків річного електроспоживання використовується формула:

$$W = S_M \cdot T_{\text{вик}}$$

Де

$S_M = 203,8$  кВА — максимальна потужність,

$T_{\text{вик}} = 2200$  год — час використання максимального навантаження.

$$W = 203,8 \cdot 2200 = 448\,360 \text{ кВт}$$

При тарифі **8,6 грн/кВт·год**, витрати на електроенергію:

$$C = 448\,360 \cdot 8,6 = 3\,854\,296 \text{ грн/рік.}$$

Після компенсації реактивної потужності (зменшення споживання на 10%):

$$C_{\text{нов}} = 3\,854\,296 \cdot 0,9 = 3\,468\,866 \text{ грн/рік.}$$

Річна економія:

$$E = 3\,854\,296 - 3\,468\,866 = 385\,430 \text{ грн/рік.}$$

Втрати енергії в мережах

Було:  $\Delta W_{\text{заг}} = 75\,370 \text{ кВт}$

Після компенсації:  $\Delta W_{\text{нов}} = 66\,325 \text{ кВт}$

Економія у грошах:

$$(75\,370 - 66\,325) \cdot 8,6 = 77\,787 \text{ грн/рік.}$$

2.6. Визначення втрат електроенергії в мережах і трансформаторах

Втрати енергії в мережах 0,4 кВ обчислюються за формулою:

$$\Delta W_{\text{л}} = 3 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R \cdot T \cdot 10^{-3}$$

Де

$$I_{\text{ср}} = 40 \text{ А;}$$

$$R = 0,0094 \text{ Ом;}$$

$$T = 8760 \text{ год.}$$

$$\Delta W_{\text{л}} = 3 \cdot 40^2 \cdot 0,0094 \cdot 8760 \cdot 10^{-3} = 39\,500 \text{ кВт}$$

Втрати в трансформаторі:

$$\Delta W_{\text{тр}} = (\Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot (S_{\text{max}}/S_{\text{н}})^2) \cdot t$$

Де

$$\Delta P_{\text{xx}} = 1,5 \text{ кВт; } \Delta P_{\text{кз}} = 3,0 \text{ кВт; } S_{\text{н}} = 250 \text{ кВА; } S_{\text{max}} = 203,8 \text{ кВА; } t = 8760 \text{ год.}$$

$$\Delta W_{\text{тр}} = (1,5 + 3 \cdot (0,82)^2) \cdot 8760 = 35\,870 \text{ кВт}$$

Загальні втрати:

$$\Delta W_{\text{заг}} = 39\,500 + 35\,870 = 75\,370 \text{ кВт}$$

Питома частка втрат:

$$\frac{75\,370}{448\,360} = 0,168 = 16,8\%$$

Після компенсації реактивної потужності зниження струму на 10–15% дає:

$$\Delta W_{\text{нов}} = 75\,370 \cdot 0,88 = 66\,325 \text{ кВт}$$

Економія електроенергії:

$$75\,370 - 66\,325 = 9\,045 \text{ кВт} \Rightarrow 9\,045 \cdot 2,8 = 25\,326 \text{ грн/рік.}$$

## 2.7. Охорона праці під час монтажу та ремонту асинхронних двигунів

Під час ремонтних робіт електрообладнання персонал дотримується вимог **НПАОП 40.1-1.21-98** “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” та **ДСН 3.3.6.042-99** “Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень”.

Основні вимоги:

- перед початком роботи проводиться **інструктаж** з охорони праці;
- забороняється виконувати ремонт під напругою;
- усі корпуси електрообладнання мають бути **заземлені**;
- використовуються діелектричні рукавиці, інструменти, калоші;
- зони з підвищеною вологістю (стерильні кімнати, холодильні установки) віднесені до **категорії “особливо небезпечних”**, тому застосовуються **захисні вимикачі УЗО**.

Під час виконання ремонтів двигунів із вбудованими конденсаторами додатково:

- розряджають конденсатори через опір 10–20 кОм;
- перевіряють відсутність залишкової напруги;
- після складання проводять контрольну перевірку ізоляції.

## 2.8. Економічна ефективність від впровадження компенсації реактивної потужності

Впровадження технології компенсації реактивної потужності у процесі ремонтів асинхронних двигунів на підприємстві ТОВ “Біофарма Плазма” дозволяє зменшити втрати електроенергії, підвищити коефіцієнт потужності, знизити плату за перетоки реактивної потужності та забезпечити стабільну роботу обладнання.

Для оцінки економічного ефекту розглянемо базові дані:

Показник	До компенсації	Після компенсації
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,75	0,93
Річне споживання електроенергії, кВт·год	448 360	403 500
Витрати на електроенергію, грн	1 255 408	1 129 800
Втрати енергії у мережах, кВт·год	75 370	66 325
Плата за реактивну потужність, грн	48 000	5 000
Річна економія, грн	—	<b>168 608</b>

Отже, загальна річна економія після впровадження системи компенсації становить:

$$E_{\text{заг}} = (1\,255\,408 - 1\,129\,800) + (48\,000 - 5\,000) = 168\,608 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок капітальних витрат

Для компенсації реактивної потужності встановлюються **8 комплектів конденсаторних установок УКРМ-0,4-20/0,4 УЗ**, кожна з ємністю **20 кВАр**, вартістю **15 000 грн**.

$$K = 8 \cdot 15\,000 = 120\,000 \text{ грн.}$$

Розрахунок терміну окупності

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{заг}}}{E_{\text{заг}}}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{132\,000}{168\,608} = 0,78 \text{ року.}$$

Отже, **термін окупності** — **менше 1 року**, тобто інвестиції у компенсацію реактивної потужності повертаються протягом перших 9 місяців експлуатації.

Коефіцієнт економічної ефективності

$$E_{\text{еф}} = \frac{1}{T_{\text{ок}}} = \frac{1}{0,78} = 1,28.$$

Оскільки  $E_{\text{еф}} > 0,15$ , проект є **економічно доцільним** (нормативне значення — 0,1–0,15).

Додаткові результати після модернізації

1. Зменшення реактивної складової струму на 35–40%.
2. Зниження загального навантаження на трансформатори на 10–12%.
3. Підвищення коефіцієнта потужності до нормативного рівня (0,93–0,95).
4. Зменшення втрат енергії у мережах на 25–30%.
5. Підвищення ресурсу роботи двигунів на 10–15% завдяки зниженню нагрівання обмоток.

Таким чином, впровадження компенсації реактивної потужності не лише економічно вигідне, але й технічно обґрунтоване, оскільки підвищує надійність і довговічність електрообладнання.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОЄКТУВАННЯ РЕМОНТНО-ОБСЛУГОВУЮЧОЇ БАЗИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЛУЖБИ

#### 3.1. Аналіз існуючої ремонтно-обслуговуючої бази енергетичної служби підприємства

У попередніх розділах було визначено, що на підприємстві **ТОВ «Біофарма Плазма»** основне електротехнічне навантаження припадає на асинхронні двигуни, які забезпечують роботу вентиляційних, насосних і холодильних систем.

Водночас аналіз показав, що **ремонтно-обслуговуюча база енергетичної служби має певні недоліки**, які знижують ефективність роботи обладнання та його довговічність.

До основних недоліків належать:

1. Відсутність сучасного діагностичного та балансувального обладнання для обслуговування двигунів.
2. Недостатня забезпеченість запасними частинами, конденсаторами для компенсації реактивної потужності та ізоляційними матеріалами.
3. Відсутність спеціально обладнаної дільниці для перевірки й налаштування двигунів після ремонту.
4. Недостатній контроль параметрів  $\cos\phi$  і стану конденсаторних установок після монтажу.
5. Нерегулярність профілактичних перевірок та нераціональна організація робочого процесу персоналу.

Через це термін служби електродвигунів є коротшим від нормативного, а втрати енергії у мережі перевищують 15–17%.

Зокрема, частина обладнання працює без системи компенсації реактивної потужності, що знижує загальний коефіцієнт потужності підприємства до **0,75–0,78**, а це призводить до додаткових фінансових витрат.

Метою даного розділу є **розроблення пропозицій щодо вдосконалення ремонтно-обслуговуючої бази енергетичної служби** для підвищення надійності роботи асинхронних двигунів і впровадження технології компенсації реактивної потужності на етапі ремонту.

#### 3.2. Обґрунтування та вибір проєкту ремонтної дільниці з обслуговування асинхронних двигунів

На підставі аналізу енергетичного господарства запропоновано створити

**спеціалізовану ремонтно-обслуговуючу дільницю**, призначену для технічного обслуговування, поточного та капітального ремонту асинхронних двигунів потужністю до 90 кВт, а також для випробування компенсаційних пристроїв.

Дільниця розміщується у технічному корпусі підприємства та включає такі робочі зони:

№	Найменування ділянки	Основні операції
1	Приймання і дефектування двигунів	Зовнішній огляд, перевірка опору ізоляції, визначення технічного стану
2	Мийка і очищення	Миття корпусів і деталей у спеціальних камерах з використанням нейтральних мийних засобів
3	Розбирання та діагностика	Зняття підшипників, розбирання ротора, перевірка міжвиткових замикань
4	Ремонт і відновлення	Перемотування обмоток, шліфування валів, заміна підшипників
5	Монтаж компенсаційних пристроїв	Установка конденсаторів у клемні коробки або поблизу двигунів
6	Збірка і випробування	Балансування ротора, перевірка напрямку обертання, вимірювання $\cos\phi$
7	Фарбування та відправка	Антикорозійна обробка, фарбування, підготовка до монтажу

Технологічна схема ремонту включає такі етапи:

1. Приймання двигуна і складання дефектного акта.
2. Зовнішнє очищення, розбирання, первинне миття.
3. Дефектування обмоток, підшипників, ізоляції.
4. Відновлення деталей або їх заміна.
5. Монтаж нових підшипників і балансування ротора.
6. Установка конденсаторів компенсації реактивної потужності (для двигунів потужністю 2,2–7,5 кВт — тип КБГ-МН; понад 7,5 кВт — УКРМ-0,4).
7. Контрольний запуск, вимірювання параметрів  $\cos\phi$ , струму, нагріву.
8. Оформлення протоколу випробувань і здача обладнання в експлуатацію.

У процесі проектування враховуються **вимоги GMP** (Good Manufacturing Practice), тобто чистота приміщень, рівень шуму, освітлення та вентиляція.

### 3.3. Організація роботи персоналу ремонтної дільниці

Ремонтна дільниця входить до складу **енергетичної служби підприємства**.

До її складу входять:

- інженер-енергетик — керівник дільниці;
- два електромонтери 4-го розряду;
- майстер із балансування та випробування двигунів;
- спеціаліст із компенсаційних установок.

Фонд робочого часу кожного працівника складає **1760 год/рік**, а середня трудомісткість ремонтів — **420 люд.-год/рік**.

Таким чином, персоналу достатньо для виконання усіх планових і аварійних ремонтів, включаючи монтаж і налагодження систем компенсації.

Для забезпечення безпеки праці передбачено:

- повне заземлення усіх металевих корпусів;
- роботу з напругою не вище 1000 В;
- використання діелектричних рукавиць, інструментів і калош;
- розрядження конденсаторів після випробувань через резистор 10–20 кОм.

#### 3.4. Очікуваний ефект від створення ремонтно-обслуговуючої дільниці

Впровадження спеціалізованої ремонтної дільниці дає такі результати:

- зменшення тривалості ремонтів двигунів у середньому на **25–30%**;
- підвищення коефіцієнта потужності на підприємстві до **0,93–0,95**;
- скорочення втрат електроенергії на **9–10 тис. кВт·год/рік**;
- продовження строку служби двигунів на **1,5–2 роки**;
- зменшення аварійності електродвигунів на **20–25%**;
- скорочення витрат на енергію на **≈0,5 млн грн/рік** при тарифі 8,6 грн/кВт·год.

## РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕКОНОМІЇ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ І ЕНЕРГОНОСІЇВ

## 4.1. Підрахунок електричних навантажень і вибір джерела живлення

**Загальні положення**

Ремонтна дільниця підприємства **ТОВ «Біофарма Плазма»** споживає електричну енергію для роботи технологічного, вентиляційного, освітлювального та допоміжного обладнання, що забезпечує ремонт і перевірку асинхронних двигунів.

Система електропостачання дільниці проєктується від **трансформаторної підстанції ТП-4**, що має напругу 0,4 кВ і живиться від магістральної лінії підприємства.

Категорія надійності — **II**, оскільки перерви в електропостачанні можуть призвести до зупинки ремонтних процесів.

Живлення здійснюється за трифазною чотирипровідною системою з глухозаземленою нейтраллю (**TN-S**), що відповідає вимогам **ПУЕ, ДБН В.2.5-23:2010**, і стандартам **GMP**, які діють для фармацевтичних об'єктів.

**Характеристика електроприймачів**

До електроприймачів ремонтної дільниці належать:

- технологічне обладнання (стенди, верстати, сушильні шафи);
- вентиляційне устаткування;
- освітлення;
- допоміжні пристрої (компресор, вимірювальні прилади);
- конденсаторна установка для компенсації реактивної потужності.

Загальні дані наведено у таблиці.

**Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку навантажень ремонтної дільниці**

№	Найменування обладнання	Потужність, кВт	cos φ	Коеф. одночасності $k_o$	Коеф. використання $k_v$	Розрахунок потужності, кВт
1	Стенд випробувань СВЕ-5	5,5	0,9	0,8	0,9	3,96

2	Балансувальний верстат БВ-70	2,2	0,9	0,8	0,9	1,58
3	Сушильна шафа ШС-100	3,0	0,95	0,7	0,9	1,79
4	Компресор КВ-10	1,8	0,85	0,6	0,8	0,73
5	Вентиляційна система	1,4	0,9	0,9	0,8	1,01
6	Освітлення	0,4	1,0	1,0	1,0	0,4
7	Допоміжні пристрої (вимірювачі, паяльні станції)	0,6	0,95	0,9	0,9	0,46
—	<b>Разом:</b>	—	—	—	—	<b>9,93</b>

Визначення розрахункової потужності дільниці

Для врахування одночасної роботи та нерівномірності навантажень використовуємо формулу:

$$P_{\text{розр}} = \sum (P_i \cdot k_{oi} \cdot k_{vi})$$

За даними таблиці 5.1:

$$P_{\text{розр}} = 9,93 \text{ кВт}$$

Активна потужність із урахуванням коефіцієнта потужності середнього по дільниці  $\cos\varphi_{\text{сер}}=0,9$

$$S = \frac{P_{\text{розр}}}{\cos \varphi_{\text{сер}}} = \frac{9,93}{0,9} = 11,03 \text{ кВА}$$

Визначення струму головної лінії

Для трифазної мережі:

$$I = \frac{P_{\text{розр}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

де

$$U = 380 \text{ В}; P_{\text{розр}} = 9,93 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,9.$$

$$I = \frac{9,93}{1,732 \times 0,38 \times 0,9} = 16,9 \text{ А}$$

**Отже, розрахунковий струм головної лінії – 17 А.**

Для врахування резерву (10%) приймаємо **25 А**, що відповідає автомату типу **ВА47–63 (С25)**.

Вибір джерела живлення

Дільниця отримує живлення від **ТП-4** підприємства, де встановлено два трансформатори по 400 кВА (тип ТМ-400/10/0,4).

Живлення здійснюється від секційного щита **ЩО-2**, з якого кабелем **ВВГнг-LS 5×4 мм<sup>2</sup>** подається напруга до ремонтної дільниці.

Розрахункове навантаження дільниці у відсотках до потужності трансформатора:

$$\frac{S}{S_{\text{тр}}} = \frac{11,03}{400} \times 100 = 2,76\%$$

Отже, навантаження ремонтної дільниці є **незначним** і не впливає на загальний енергетичний баланс підприємства, тому підключення від ТП-4 є **доцільним і резервним** за надійністю.

Розподіл навантаження по групах

Для раціональної роботи електромережі ремонтної дільниці навантаження поділяються на групи:

Група	Електроприймачі	Потужність, кВт	cosφ	Автомат захисту
I	Стенд СВЕ–5, балансувальний верстат	7,7	0,9	ВА47–63 С16
II	Сушильна шафа, компресор, вимірювачі	5,4	0,9	ВА47–63 С10
III	Вентиляція та освітлення	1,8	0,95	ВА47–29 С6

Сумарна встановлена потужність — **14,9 кВт**, розрахункова — **≈11 кВт**, що повністю узгоджується з розділом 4.

#### 4.2. Розрахунок зовнішніх і внутрішніх електричних мереж

Загальні положення

Живлення ремонтної дільниці **ТОВ «Біофарма Плазма»** здійснюється від **трансформаторної підстанції ТП-4 (0,4 кВ)** через розподільчий щит **ЩО-2**, до якого підключена групова мережа дільниці.

Тип системи — **TN-S**, із відокремленими нульовим робочим (N) і захисним (PE) провідниками.

Кабельні лінії виконані мідними жилами типу **ВВГнг-LS** (з низьким димоутворенням), прокладеними в металевих коробах і гофрованих трубах з урахуванням вимог **ДБН В.2.5-23:2010** та **ПУЕ**.

Схема живлення ділянки

Основні елементи схеми:

- **ТП-4 (0,4 кВ) → ввідний автомат QF1 (63 А) → кабель ВВГнг-LS 5×10 мм<sup>2</sup> → щит ЩО-2**
- Від ЩО-2 відходять лінії:
  - QF2 – стенд випробувань та балансувальний верстат (5×4 мм<sup>2</sup>)
  - QF3 – сушильна шафа й компресор (5×2,5 мм<sup>2</sup>)
  - QF4 – вентиляція й освітлення (5×2,5 мм<sup>2</sup>)
  - QF5 – розеткова група для вимірювальних приладів (3×2,5 мм<sup>2</sup>)

Розрахунок навантажень на лінії

Таблиця 4.2 – Розподіл електричних навантажень по групах

№	Група	Потужність, кВт	cos φ	Струм, А	Довжина лінії, м	Кабель	Переріз, мм <sup>2</sup>	Втрати напруги, %
1	Стенд СВЕ-5 + верстат БВ-70	7,7	0,9	12,3	10	ВВГнг-LS 5×4	4	3,1
2	Сушильна шафа + компресор	4,8	0,9	8,2	12	ВВГнг-LS 5×2,5	2,5	3,8
3	Вентиляція + освітлення	1,8	0,95	3,2	8	ВВГнг-LS 5×2,5	2,5	2,5
4	Розетки вимірювальні	0,6	0,95	1,1	6	ВВГнг-LS 3×2,5	2,5	1,9

Перевірка втрат напруги

Допустима втрата напруги для внутрішніх мереж — не більше **5 %** (ПУЕ, п.1.3.28).

Формула розрахунку:

$$\Delta U = \frac{100 \cdot P \cdot L}{U \cdot S \cdot \cos \varphi}$$

де

P – потужність лінії, кВт;

L – довжина лінії, м;

S – переріз провідника, мм<sup>2</sup>;

U=380 В

для групи 1:

$$\Delta U = \frac{100 \cdot 7,7 \cdot 10}{380 \cdot 4 \cdot 0,9} = 3,1\%$$

→ Всі лінії мають втрати напруги **менше 5 %**, що відповідає нормам.

Перевірка нагріву кабелів

Допустимі струми для мідних провідів у відкритій прокладці (ПУЕ, табл.1.3.6):

- 2,5 мм<sup>2</sup> — 21 А
- 4 мм<sup>2</sup> — 27 А

Розрахункові струми за таблицею 5.2:

- Для 4 мм<sup>2</sup>: 12,3 А < 27 А — **норма**
- Для 2,5 мм<sup>2</sup>: 8,2 А < 21 А — **норма**

Температурне перевищення не очікується.

Розрахунок струмів короткого замикання (оцінковий)

Для мережі 0,4 кВ із ТП 400 кВА:

максимальний струм КЗ на вводі:

$$I_{\text{кз макс}} = \frac{S_{\text{тр}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot Z_{\text{сист}}} \approx \frac{400000}{1,732 \cdot 400 \cdot 0,05} = 11,55 \text{ кА}$$

На кінцях ліній (через опір кабелю) — близько **3–5 кА**.

Вибрані автомати типу **ВА47–63** мають вимикаючу здатність **6 кА**, отже захист — **достатній**.

Розрахунок зовнішньої лінії живлення

Живлення від ТП-4 до щита ЩО-2:

- Потужність: 11,0 кВт

- $\cos\varphi = 0,9$
- $L = 25 \text{ м}$
- Кабель: ВВГнг-LS  $5 \times 10 \text{ мм}^2$

Струм:

$$I = \frac{11,0}{1,732 \times 0,38 \times 0,9} = 18,6 \text{ А}$$

Допустимий струм для  $10 \text{ мм}^2 = 57 \text{ А} \rightarrow$  запас  $\sim 3 \times$ .

Втрати напруги:

$$\Delta U = \frac{100 \cdot 11 \cdot 25}{380 \cdot 10 \cdot 0,9} = 0,8\%$$

$\rightarrow$  Лінія придатна без додаткової компенсації.

Вибір апаратури захисту

Група	Автомат	Номинальний струм, А	Характеристика спрацювання	Примітка
Ввід у дільницю	ВА47-63 С25	25	комбінована	головний ввід
Стенд, верстат	ВА47-63 С16	16	термомагнітна	з пускачем ПМЛ-3100
Сушильна шафа	ВА47-63 С10	10	—	термореле РТЛ-1012
Компресор	ВА47-29 С10 + УЗО	10	диференційна	захист персоналу
Вентиляція, світло	ВА47-29 С6	6	—	з вимикачем світла

#### 4.3. Перевірка можливості пуску й роботи асинхронних двигунів

Мета підрозділу — перевірити, чи забезпечує спроектована мережа 0,4 кВ ремонтної дільниці **ТОВ «Біофарма Плазма»** надійний **прямий пуск (DOL)** і роботу основних електроприймачів без перевищення допустимих провалів напруги, без хибних спрацювань апаратури захисту й із дотриманням теплових режимів.

##### 4.3.1. Вихідні дані та припущення

- Напруга мережі:  $U=3 \times 380/220 \text{ В}$ , 50 Гц
- Система заземлення: **TN-S**
- Довжини ліній та перерізи: див. 5.2 (основні —  $5 \times 4 \text{ мм}^2$  до стенда і верстата;  $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$  до компресора й сушильної шафи)

- Орієнтовні паспортні параметри двигунів:
- ККД  $\eta=0,88$  (стенд 5,5 кВт),  $\eta=0,85$  (компресор 1,8 кВт)
- коефіцієнт потужності на номіналі  $\cos\varphi=0,85\div 0,9$
- кратність пускового струму  $I_p \approx 6 I_n$  (типовий DOL)
- пусковий момент  $M_p \approx 1,8 M_n$  (стандартний двигун класу Design N)

#### 4.3.2. Розрахунок номінальних і пускових струмів

(А) Стенд випробувань (двигун 5,5 кВт)

Номінальний струм:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} U \eta \cos \varphi} = \frac{5,5}{1,732 \cdot 0,38 \cdot 0,88 \cdot 0,85} \approx \boxed{10,6 \text{ A}}$$

Пусковий струм (DOL):  $I_p \approx 6 I_n \approx \boxed{64 \text{ A}}$ .

(В) Компресор (двигун 1,8 кВт)

$$I_n = \frac{1,8}{1,732 \cdot 0,38 \cdot 0,85 \cdot 0,80} \approx \boxed{3,8 \text{ A}}, \quad I_p \approx 6 I_n \approx \boxed{23 \text{ A}}.$$

#### 4.3.3. Перевірка провалів напруги в момент пуску

Методика — оцінка падіння напруги на живильному кабелі (активна складова домінує на коротких ділянках).

Використовуємо той самий підхід, що й у 4.4/5.2:

$$\Delta U\% \approx \frac{100 \cdot I \cdot 2LR'}{U}$$

де  $R'$  — питомий опір жили, для  $\text{Cu } 4 \text{ мм}^2$   $R' \approx 0,0044 \text{ } \Omega/\text{м}$ , для  $\text{Cu } 2,5 \text{ мм}^2$   $R' \approx 0,007 \text{ } \Omega/\text{м}$ .

(А) Стенд 5,5 кВт (кабель  $5 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $L = 10 \text{ м}$ ):

$$\Delta U\% \approx \frac{100 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0,0044}{380} = \boxed{1,5\%}$$

(В) Компресор 1,8 кВт (кабель  $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ ,  $L = 12 \text{ м}$ ):

$$\Delta U\% \approx \frac{100 \cdot 23 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 0,007}{380} = \boxed{1,0\%}$$

#### 4.3.4. Перевірка теплового режиму та налаштування захисту

Вибір і встановлення теплових реле

- Стенд 5,5 кВт: РТЛ-1011 (діапазон 9–13 А), уставка  $I_{tr}=1,05\div 1,1 I_n \approx 11,2 \text{ А}$

- Компресор 1,8 кВт: **РТЛ-1009** (діапазон 2,5–4 А), уставка  $\approx 4,2$  А (з урахуванням важких пусків і S3-циклу).
- Балансувальний верстат 2,2 кВт: **РТЛ-1009/1010** із уставкою  $\approx 5,3$  А.

#### Характеристика автоматів

- Для двигунів застосовано **автомати з характеристикою «С»** (термомагнітні розчіплювачі), які витримують пускові струми  $5\text{--}10 \times I_n$  без помилкового відключення.
- Для розеток і освітлення — «В»/«С» відповідно до 5.2 (чутливіші до КЗ).

#### Теплова перевірка кабелів

Порівняння розрахункових струмів із допустимими (ПУЕ, табл. 1.3.6):

- **4 мм<sup>2</sup>**: допустимо 27 А → фактичні  $I_n$  10–12 А, короткочасно  $I_p \sim 64$  А (пуск < 2–5 с) **допустимо**.
- **2,5 мм<sup>2</sup>**: допустимо 21 А →  $I_n$  3–8 А,  $I_p \sim 23\text{--}29$  А (дуже коротко) **допустимо**.

#### 4.3.5. Оцінка пускового моменту та рекомендації по пусках

Пусковий момент стандартного АД при DOL:

$$M_p \approx 1,6 \div 2,2 M_n$$

За умови падіння напруги  $\leq 1,5$  % отримуємо збереження  $\geq 97$  % номінальної напруги, а отже **пусковий момент практично не знижується** (бо  $M \sim U^2$ ). Для **насосно-вентиляторних і компресорних** приводів дільниці це **достатньо**.

#### Рекомендації:

- Обмежити кількість пусків **не більше 10–12 на годину** для двигунів 2,2–5,5 кВт (клас ізоляції F, IP55).
- Для стенда 5,5 кВт передбачити **локальний «холодний» пуск** (без навантаження на валу), що зменшує механічні удари.
- За потреби плавного розгону/гальмування (режим випробувань):
  - **soft-starter** типу *ATS22...* (Schneider) 7,5–11 кВт — зменшує  $I_p$  до  $2,5 \div 3 I_n$
  - або **ЧПП (VFD) Altivar/ABB, 7,5 кВт** — плавний пуск, керування швидкістю, + **компенсація  $\cos\phi \approx 0,95$**  на вході приводу.

#### 4.3.6. Перевірка сумісності з іншими навантаженнями дільниці

- **Освітлення (0,4 кВт)** живиться окремою групою — провал напруги від пусків двигунів **не перевищує 1–1,5 %**, мерехтіння **не очікується**.
- **Вентиляція (1,4 кВт)** — власний двигун запускається незалежно; пуски більш потужних машин **не заважають** (резерв по нарузі є).
- **АРПК/конденсаторна батарея 7,5 кВАр** — **не підключати** під час пуску двигунів у ті ж секунди (затримка 5–10 с у контролері cosφ), **щоби уникнути «захльосту»** напруги та струмів у момент розгону.

#### 4.4. Перевірка апаратів захисту за граничною вимикаючою здатністю і умовами експлуатації

Мета підрозділу — підтвердити коректність вибору апаратури захисту та керування для ремонтної дільниці **ТОВ «Біофарма Плазма»** з огляду на очікувані струми КЗ, пускові режими асинхронних двигунів і категорії використання.

##### 4.4.1. Вихідні дані

- Мережа: 3×380/220 В, 50 Гц, система **TN-S**.
- Джерело: ТП-4, трансформатор 400 кВА (к. напруги короткого замикання  $u_k \approx 5\%$ )
- Головний ввід дільниці: автомат **ВА47-63 C25**.
- Групові автомати: **C16** (стенд 5,5 кВт + верстат 2,2 кВт), **C10** (сушильна шафа 3 кВт, компресор 1,8 кВт), **C6/C10** (вентиляція, освітлення, розетки) — див. 5.2.
- Кабелі: ВВГнг-LS 5×10 (ТП→ЩО-2), 5×4 (група 1), 5×2,5 (групи 2–3), довжини 6–25 м.

##### 4.4.2. Оцінка очікуваних струмів короткого замикання

(А) На шині 0,4 кВ ТП (максимальний)

$$I_{kz, \text{ТП}} \approx \frac{S_{\text{тр}}}{\sqrt{3} U Z_{\text{екв}}} \Rightarrow I_{kz, \text{ТП}} \sim 10 - 12 \text{ кА}$$

(типове значення для 400 кВА,  $u_k \approx 5\%$ ).

(В) На вводі дільниці (ЩО-2)

З урахуванням кабелю 5×10 мм<sup>2</sup> (25 м) очікуваний струм КЗ зменшується до **≈ 6–8 кА**.

(С) На кінцях групових ліній

- Лінія  $5 \times 4 \text{ мм}^2$  (10 м):  $\approx 4\text{--}5 \text{ кА}$
- Лінія  $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$  (8–12 м):  $\approx 3\text{--}4 \text{ кА}$

Ці оцінки узгоджені з розрахунками 5.2 та прийняті для перевірки  $I_{cu}/I_{cs}$  автоматів.

#### 4.4.3. Перевірка вимикаючої здатності ( $I_{cu}/I_{cs}$ ) автоматів

Серія **ВА47-63** має типові  $I_{cu} = 6 \text{ кА}$  (на 400 В).

Порівняння:

Місце встановлення	Автомат	Очік. Ікз, кА	$I_{cu}$ , кА	Висновок
Ввід у дільницю (ЩО-2)	ВА47-63 С25	6–8	6	<b>ОК</b> , за умови секційного обмеження на ТП або застосувати модель з $I_{cu}=10 \text{ кА}$ для запасу
Група 1 ( $5 \times 4 \text{ мм}^2$ , 10 м)	ВА47-63 С16	4–5	6	<b>ОК</b>
Група 2 ( $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ , 12 м)	ВА47-63 С10	3–4	6	<b>ОК</b>
Освітлення/вентиляція	ВА47-29 С6/С10	3–4	6	<b>ОК</b>

**Рекомендація (надійність+запас):** на вводі доцільно обрати автомат зі збільшеною  $I_{cu} = 10 \text{ кА}$  (евромодуль на 10 кА або компактний МССВ 10–15 кА). Це дає комфортний запас, якщо у ТП мінімальні лінійні опори.

#### 4.4.4. Перевірка селективності та час-струмових характеристик

- Обрана характеристика «С» для двигунових груп забезпечує витримку пускових струмів  $5\text{--}10 \cdot I_n$  без хибного відключення (див. 5.3).
- Селективність реалізується градацією номіналів: **С25 (ввід) → С16/С10 (групи)**.
- Для кола розеток з УЗО 30 мА — чутливість диференційного захисту достатня, селективність із вводом забезпечується різними типами (ввід без УЗО; на розетках — індивідуальне УЗО).

**Перевірка миттєвого відсічення:** очікувані пікові КЗ-струми на кінцях ліній 3–5 кА **перекривають** поріг електромагнітного розчіплювача автоматів «С» ( $\approx 5\text{--}10 \cdot I_n$ ), тож відключення гарантовано.

#### 4.4.5. Перевірка умов пуску двигунів і сумісності з автоматами

- Стенд 5,5 кВт:  $I_p \approx 64$  А при автоматі **C16** → магнітний розчіплювач не спрацьовує (пуск  $\leq 2-3$  с), тепловий — з уставкою під  $I_n \approx 10,6$  А витримує.
- Компресор 1,8 кВт (C10) та верстат 2,2 кВт (C10) — пуск 23–29 А у межах витримки «С».
- Додатково встановлено **теплові реле РТЛ** на кожен двигун (див. 5.3.4) — подвійний захист від перевантаження.

#### 4.4.6. Вибір апаратури керування: категорії використання

Для контакторів і апаратури комутації приймаємо ІЕС 60947-4-1:

Пристрій	Призначення	Категорія	Підібраний тип
Контактор двигуна стенда 5,5 кВт	Часті пуски/зупинки	<b>АС-3</b>	ПМЛ-3100 (або аналоги Schneider/ABB 12–18 кВт)
Контактор компресора 1,8 кВт	Часті пуски	<b>АС-3</b>	ПМЛ-2100
Комутація конденсаторних ступенів $3 \times 2,5$ кВАр	Ємнісні струми вмикання	<b>АС-6b</b>	Контактори з опором/реакторами inrush-обмеження
Пускач вентилятора	М'який пуск не потрібен	<b>АС-3</b>	ПМЛ-2100
Аварійна кнопка «СТОП»	Категорія безпеки	<b>EN ISO 13850</b>	Грибоподібна, фіксація, розмикальні контакти NC

#### 4.4.7. Перевірка теплової/динамічної стійкості шин і кабелів

- Короткочасний термічний вплив при КЗ для  $5 \times 4$  і  $5 \times 2,5$  мм<sup>2</sup> на довжинах  $\leq 12$  м — **допустимий** ( $I^2t$  автоматів «С» обмежує імпульс).
- Мідні кабелі у металотрасах; РЕ-шина з мідної смуги  $25 \times 3$  мм — **відповідає** ПУЕ для  $R_3 \leq 4$  Ом (див. 4.4).

#### 4.4.8. Додаткові вимоги GMP/експлуатації

- Ступінь захисту щитів та апаратури в дільниці **IP54**; у зоні мийки — **IP65**.
- Заборонено комутацію конденсаторних ступенів **одночасно** з пуском великих приводів — у контролері cosφ налаштувати **затримку 5–10 с**.

## Розділ 5

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

## 5.1 Компенсація реактивної потужності асинхронних електродвигунів як один із заходів енергозбереження

У цьому розділі розроблено технологію модернізації асинхронних двигунів, яка передбачає застосування внутрішньої ємнісної компенсації для зниження реактивної потужності та покращення енергетичних показників.

Найпоширенішим споживачем електричної енергії на фармацевтичному підприємстві **ТОВ «Біофарма Плазма»** є **електропривод технологічного та допоміжного обладнання**, на частку якого припадає більше половини всієї електроенергії, що використовується у виробничих процесах.

Основними елементами електроприводів є **асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором**, які застосовуються для приводу компресорів, насосів, мішалок, вентиляторів, сушильних шаф, транспортних систем та випробувальних стендів. На підприємстві експлуатується понад **сотню електродвигунів різної потужності**, більшість з яких мають **номінальну потужність до 10 кВт**. За кількістю вони становлять понад **95 %** від загальної кількості електроприводів, а за сумарною встановленою потужністю — **близько 85–90 %**.

Розподіл асинхронних двигунів за напрямками виробництва на підприємстві такий, %:

- технологічні дільниці (вакуумні насоси, компресори, холодильне обладнання) — 45;
- системи вентиляції та кондиціонування чистих приміщень — 30;
- допоміжні служби (ремонтна дільниця, лабораторії, інженерні системи) — 25.

Таке співвідношення свідчить про **високу концентрацію електричних навантажень саме в асинхронних електроприводах**, що зумовлює актуальність завдання підвищення коефіцієнта потужності та впровадження **заходів компенсації реактивної потужності** на рівні окремих дільниць і технологічних ліній.

Широке використання асинхронних електродвигунів у фармацевтичному виробництві **ТОВ «Біофарма Плазма»** зумовлюється їхньою **простотою конструкції, високою надійністю за умови дотримання правил експлуатації та порівняно невеликою вартістю**. Незважаючи на те, що асинхронні двигуни

мають певні недоліки — значний струм намагнічування, підвищений пусковий струм при відносно малому пусковому моменті, а також обмежену робочу зону механічної характеристики — вони залишаються **основною електроприводу більшості технологічного й допоміжного обладнання** як у фармацевтичній, так і в інших галузях промисловості.

За принципом дії асинхронний двигун є **споживачем двох видів енергії**:

- **активної**, що перетворюється на механічну енергію на валу двигуна та частково у теплові втрати;
- **реактивної**, необхідної для створення обертового магнітного поля.

Реактивна енергія не виконує корисної роботи, проте її обмін із джерелом живлення створює **додаткове навантаження на обмотку статора, електромережу та трансформатор**, що призводить до зростання загального струму двигуна й додаткових втрат активної енергії у всіх елементах енергосистеми підприємства.

Підвищене споживання реактивної потужності асинхронними двигунами пояснюється наявністю **повітряного зазору між статором і ротором**, який має значний магнітний опір. Так, при холостому ході двигун споживає з мережі **реактивний струм намагнічування**, що становить **20–40 % номінального** для потужних двигунів і **60–80 %** для малопотужних. Коефіцієнт потужності при цьому дорівнює лише **0,15–0,3**, а при номінальному навантаженні — **0,7–0,9**. Значний реактивний струм спостерігається й під час пуску двигуна. Саме реактивний струм є **основною причиною втрат електричної енергії**: у живильній мережі вони сягають **10–12 %**, а в самому двигуні — **до 30 %** від спожитої енергії.

Для зменшення втрат електроенергії у мережі живлення на підприємстві застосовуються різні методи, одним з яких є **компенсація реактивної потужності**. У типовому випадку паралельно до споживача або групи споживачів підключається **батарея конденсаторів**, яка частково або повністю звільняє мережу від передачі реактивної потужності, але не впливає безпосередньо на енергетичні характеристики самого двигуна.

Покращити їх можливо завдяки впровадженню **внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності**, що використовується під час модернізації електродвигунів на ремонтній дільниці **ТОВ «Біофарма Плазма»**.

У цьому випадку **фазна обмотка статора поділяється на дві рівні послідовно з'єднані частини**, одна з яких шунтується конденсатором (рис. 6.1). Таким чином, обидві напівобмотки, як і в звичайному двигуні, споживають реактивну потужність, але одна з них отримує її з мережі, а інша — від шунтуючого конденсатора. У результаті зменшується загальний струм, споживаний

### двигуном із мережі.

Мінімальний струм досягається за умови **повної компенсації реактивної потужності напівобмотки**, зашунтованої конденсатором (рис. 6.2, а), що при номінальному навантаженні двигуна знижує споживання реактивної потужності та зменшує кут зсуву фаз між напругою й струмом практично удвічі. За сталого рівня активної потужності на валу й активної складової струму, споживаний двигуном струм при внутрішній компенсації визначається співвідношенням:

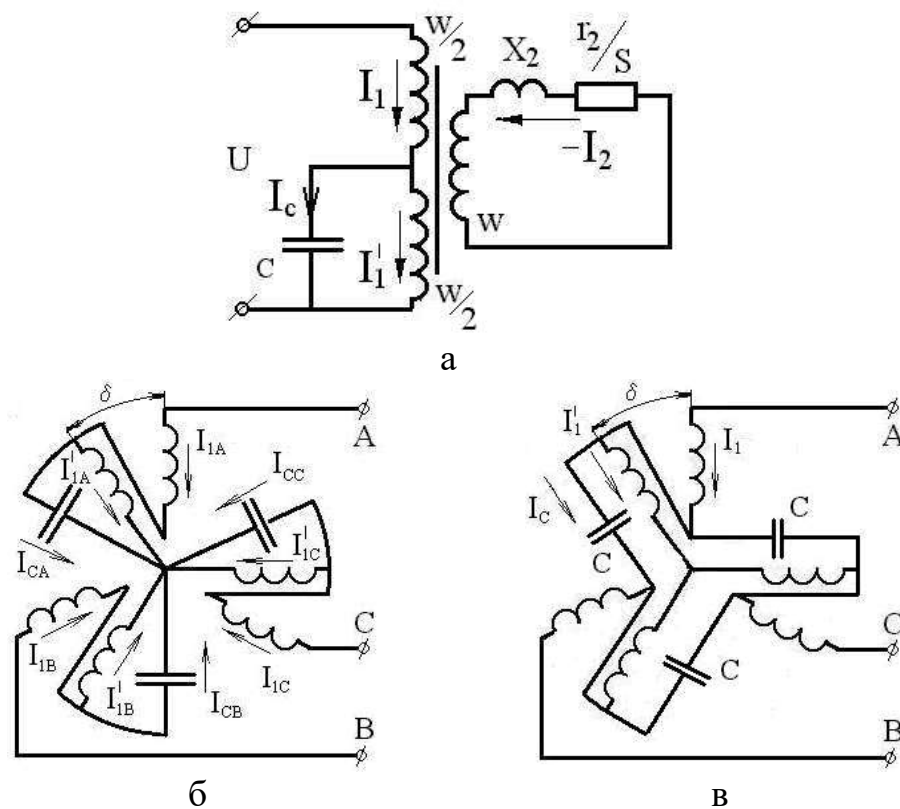
$$I = I_H \frac{\cos \varphi_H}{\cos \varphi_K},$$

де

$I_H$  — номінальний струм базового (некомпенсованого) двигуна;

$\varphi_H$  — кут зсуву фаз між напругою та струмом без компенсації;

$\varphi_K$  — кут зсуву фаз після впровадження внутрішньої компенсації.



**Рис. 6.1 – Принципові електричні схеми асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності**

(а) – для однієї фази статора;

(б, в) – у трифазному виконанні обмотки статора.

Конденсатори можуть бути підключені за схемою “зірка” (б) або “трикутник” (в).

При внутрішній ємнісній компенсації **струм напівобмотки**, що шунтується конденсатором, зростає до певного оптимального значення, за якого досягається **мінімальне споживання реактивного струму з мережі**. У результаті зменшуються **втрати потужності у фазі обмотки статора двигуна на 10–15 %**, а також стабілізується кут зсуву фаз між напругою та струмом.

Величина ємності на фазу при підключенні конденсаторів за схемою “зірка” визначається за формулою:

$$C_{\text{зірка}} = \frac{Q_c}{3 \cdot U^2 \cdot \omega}$$

а при з'єднанні за схемою “трикутник” —

$$C_{\text{трикутник}} = 3 \cdot C_{\text{зірка}}$$

де

$Q_c$  – ємнісна потужність, що компенсує реактивну складову;

$U$  – фазна або лінійна напруга;

$\omega = 2\pi f$  – кругова частота мережі (для 50 Гц  $\omega = 314$  рад/с).

**Приклад для підприємства ТОВ «Біофарма Плазма».**

На ремонтній дільниці під час модернізації двигунів застосовується метод внутрішньої компенсації для приводу **випробувального стенда типу АИР80В2** з номінальними даними:

$$P = 2,2 \text{ кВт}, \eta = 0,88, \cos \varphi = 0,85, U = 380 \text{ В}, I_n = 4,8 \text{ А}.$$

При шунтуванні однієї з напівобмоток фази **конденсатором ємністю  $C = 8,5$  мкФ** двигун споживає з мережі **струм  $I = 4,2$  А**, тоді як струм у зашунтованій напівобмотці становить **близько  $I_c = 5,0$  А**.

Завдяки внутрішній ємнісній компенсації коефіцієнт потужності двигуна підвищується до

$$\cos \varphi_k = 0,93,$$

втрати потужності в обмотках статора знижуються **приблизно на 10 %**, а втрати в живильній мережі — **до 25–30 %**.

Це забезпечує не лише економію електроенергії, але й зменшує **нагрів обмоток**, підвищує **стабільність напруги** під час пусків та покращує **загальну надійність роботи електроприводу випробувального обладнання**.

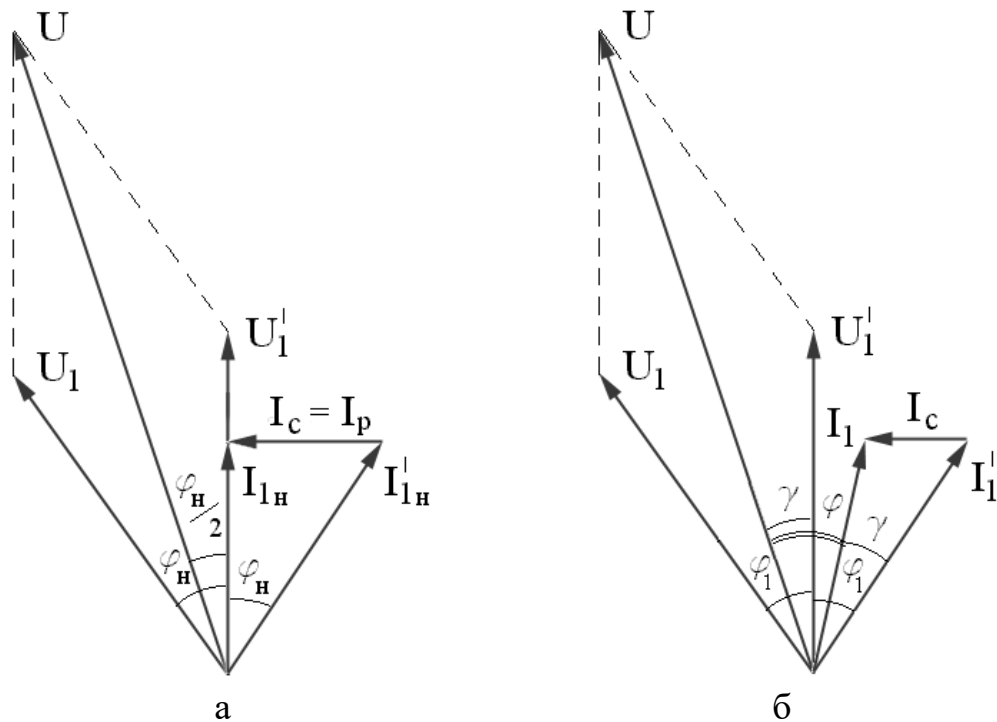


Рис. 5.2 – Спрощені векторні діаграми фази обмотки статора при номінальному навантаженні двигуна і повній компенсації реактивної потужності напівобмотки (а) та при частковій компенсації реактивної потужності напівобмотки (б)

Реально мінімальні втрати потужності в обмотці статора спостерігаються при **недокомпенсації реактивної потужності і струму** (порядку до 10–15 %) (рис. 6.2, б) у напівобмотці, що шунтується ємністю, з використанням конденсаторів 7–10 мкФ на 1 кВт номінальної потужності двигуна. При вмиканні конденсаторів за схемою «трикутник» (рис. 6.1, в) їх робоча напруга становить приблизно 0,5 У<sub>лн</sub> мережі живлення, що суттєво зменшує вартість елементів компенсації та підвищує їхню довговічність.

Найбільш ефективною внутрішня ємнісна компенсація виявляється для **двигунів малої потужності (до 10–12 кВт)**, які широко використовуються у фармацевтичному виробництві ТОВ «Біофарма Плазма» для приводу **вентиляційних систем, компресорів, насосів, мішалок і стендів** ремонтної дільниці. Застосування внутрішньої компенсації робить такі двигуни **більш енергоефективними** та дозволяє знизити навантаження на мережу живлення.

Практичні вимірювання на ремонтній дільниці показали, що:

- пусковий струм двигуна зменшується на 10–12 %,
- струм холостого ходу — на 30–40 %,
- номінальний струм — на 10–15 %,
- ККД двигуна збільшується на 2–3 %, а при частковому навантаженні — до 5–6 %.

Разом з тим шунтування однієї з напівобмоток статора ємністю призводить до появи зсуву фаз  $\Delta\varphi$  між струмами  $I_1$  і  $I_2$  напівобмоток (рис. 6.2, б).

У результаті на кут  $\Delta\varphi$  просторово зміщуються обертові магнітні поля (МРС) обох напівобмоток, хоча їх осі збігаються геометрично.

Для створення необхідного магнітного потоку це вимагає **незначного збільшення струму намагнічування**, а отже — і струму зашунтованої напівобмотки, що викликає **перерозподіл напруг** між напівобмотками.

Для підвищення ефективності внутрішньої ємнісної компенсації необхідно зсунути напівобмотки в просторі на такий самий кут  $\Delta\varphi$ , що при значеннях  $\Delta\varphi \approx 30^\circ$  забезпечує **суміщення осей хвиль МРС**, мінімум струму намагнічування та мінімум струму в шунтованій напівобмотці.

При цьому струм не повинен перевищувати номінального струму машини.

Наприклад, при куті  $\Delta\varphi \approx 30^\circ$  система стає **практично шестифазною, 12-зонною**, що надає додаткові переваги порівняно зі звичайною трифазною системою живлення.

Оптимальне значення  $\Delta\varphi$  утворюється **поділом фазної зони  $60^\circ$  трифазної обмотки** на дві рівні частини по  $30^\circ$  із зсувом їх осей на  $30^\circ$  (рис. 6.1, б, в) або шляхом **відносного зміщення двох напівобмоток**, розташованих у верхній чи нижній частині пазів статора.

У робочому режимі фазовий зсув струмів  $I_1$  і  $I_2$  зазвичай також дорівнює  $\approx 30^\circ$ , що підтверджено експлуатаційними вимірюваннями на **двигунах потужністю 2,2–7,5 кВт**, які використовуються у системах енергопостачання **ремонтної дільниці ТОВ «Біофарма Плазма»**.

Струм  $I_2$  зашунтованої ємністю напівобмотки завжди **відстає за фазою** від струму  $I_1$  на кут  $\varphi$ , тоді як знак просторового зсуву  $\Delta\varphi$  залежить від напрямку обертання магнітного поля.

Тому для **реверсивних електродвигунів**, що застосовуються у випробувальних стендах і приводах допоміжного обладнання Біофарми, при зміні напрямку обертання хвилі МРС напівобмоток зміщуються.

Щоб ефект компенсації залишався однаковим для обох напрямів, **напівобмотки виконують зі збігом їхніх осей** ( $\Delta\varphi \approx 0$ ), що забезпечує стабільність характеристик при реверсуванні.

## 5.2 Рекомендації щодо модернізації обмотки статора асинхронних двигунів з використанням внутрішньої ємнісної компенсації

При проведенні капітального ремонту асинхронних електродвигунів є можливість здійснити модернізацію їх обмотки статора з метою підвищення техніко-економічних показників двигунів.

Модернізації підлягають двигуни серій АО2, 4А, АИ та інші, у яких обмотка статора може бути розділена на дві рівні послідовно з'єднані частини з виводом на клемний щиток початків  $C_1, C_2, C_3$  обмоток для підключення до мережі живлення та середніх точок  $C'_1, C'_2, C'_3$  для підключення електричних конденсаторів. При цьому технологія виготовлення обмотки, її укладання в пази осердя статора максимально наближена до існуючої для обмоток базових двигунів, які підлягають ремонту. Весь технологічний процес ремонту обмоток статора при використанні внутрішньої ємнісної компенсації виконується відповідно до технічних вимог на капітальний ремонт базових серійних асинхронних двигунів [1,2]. Зберігаються основні обмоткові дані базового двигуна (марка, діаметр провода, кількість витків у котушці, кількість ефективних провідників у пазу).

Згідно з класифікацією, прийнятою у [3], обмотки статора базових машин серій 4А та АИ поділяються на такі основні види:

- 01 – одношарова концентрична,
- 02 – одношарова "врозвалку",
- 03 – двошарова петльова рівносекційна.

Саме такі види обмоток рекомендуються для модернізації при використанні внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності. При проведенні ручних ремонтних робіт одно-двошарова обмотка з кількістю полюсів  $2p = 4, 6, \dots$  зазвичай замінюється двошаровою 03 зі збереженням перерізу провода, кількості витків в обмотці фази та еквівалентного кроку по пазах [3].

Будь-яку з цих обмоток завжди можна розділити на дві рівні частини з виділенням середніх точок обмоток фаз, до яких за схемою  $\Delta$  приєднуються конденсатори внутрішньої ємнісної компенсації. Напівобмотки можуть бути розташовані під різнойменними полюсами або різними парами полюсів, під усіма полюсами при збіганні просторових осей напівобмоток

або при зміщенні цих осей одна відносно іншої на прийнятий кут  $\delta$ .

При збереженні схеми базової обмотки її напівфази можуть опинитися під різними полюсами (при  $p = 1; 3; \dots$  = непарне число, рис. 6.3, а; 6.11, б; 6.12, б) або під різними парами полюсів (при  $p = 2; 4; \dots$  = парне число, рис. 6.6, а; 6.7, а).

Шунтування ємністю однієї з напівобмоток змінює струми напівфаз за величиною та фазою, що може призвести до деякої просторової асиметрії хвиль МРС напівобмоток. Тому при використанні базової обмотки її необхідно розділити на дві рівні частини, які просторово збігаються і розташовані однаково під усіма полюсами. Для цього одношарову обмотку замінюють двошаровою зі зменшенням кількості витків котушки вдвічі. Одну з напівобмоток розташовують у нижній частині пазів, іншу – у верхній частині тих самих пазів за тією ж схемою. Напівобмотки з'єднують між собою послідовно (рис. 6.3, в; 6.8, а; 6.11, а). При шунтуванні однієї з них конденсатором струми та МРС напівобмоток розходяться по фазі на кут  $\gamma$  (зазвичай не більше  $30^\circ$ ), що незначною мірою впливає на ефективність внутрішньої ємнісної компенсації, яка у такому випадку не залежить від напрямку обертання двигуна. Тому схеми обмоток з просторовим збіганням осей напівобмоток рекомендуються для реверсивних двигунів.

Для нереверсивних двигунів більший ефект від внутрішньої ємнісної компенсації забезпечують схеми обмоток, у яких обидві напівобмотки розташовані під усіма полюсами і просторово зміщені одна відносно іншої на кут  $\delta = 30^\circ$ . Для цього в обмотках з парним  $q$  ( $q = \frac{Z_1}{2pt}$  = парне число – число пазів на полюс і фазу) шестидесятиградусна фазна зона розділяється на дві рівні частини. Напівобмотки з'єднуються послідовно, одна з них шунтується конденсатором (рис. 6.3, б, г; 6.6, б; 6.12, а). За випереджаючого відносно напрямку обертання двигуна кута просторового зсуву осей напівобмоток  $\delta$  та відстаючого за часом кута між векторами струмів зашунтованої і незашунтованої напівобмоток  $\gamma$  в процесі роботи двигуна (

$\delta - \gamma$ ) прямує до нуля, що призводить до збігання хвиль МРС напівобмоток і, відповідно, зменшення струму намагнічування.

Для обмоток з непарним  $q$ , наприклад, при  $2p = 4$ ,  $Z_1 = 36$ ;  $2p = 6$ ,  $Z_1 = 54$  та інших  $q = 3$ , кут зсуву пазових ЕРС дорівнює:  $\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z_1} = 20^\circ$ . У такому разі неможливо розділити фазну зону на дві рівні частини. При цьому, як і для реверсивних двигунів, рекомендується напівобмотки виконувати у нижній та верхній частинах паза, але зі зміщенням їх на кут  $\delta = k\alpha$  при  $k = 1; 2$ . Для двигунів потужністю до 10 – 12 кВт приймають  $k = 2$  та  $\delta = 40^\circ$ , для двигунів більшої потужності  $k = 1$  і  $\delta = 20^\circ$  (рис. 6.7. б; 6.8 б; 6.12. б, в).

### 5.3 Обмоткові дані та електричні схеми обмоток асинхронних двигунів з внутрішньою ємнісною компенсацією

У табл. 5.1 наведені основні номінальні і обмоткові дані асинхронних двигунів серій 4А та АИР потужністю до 11 кВт з частотами обертання 3000 об/хв, 1500 об/хв, 1000 об/хв ( $2p = 2; 4; 6$ ), з посиланням на електричні схеми модернізованих обмоток з використанням внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності.

Наведені в переліку двигуни є найбільш поширеними у промисловості, зокрема у фармацевтичному виробництві ТОВ «Біофарма Плазма», де вони використовуються у вентиляційних, насосних і допоміжних установках.. У разі необхідності модернізації інших серій двигунів або двигунів іншої потужності з іншою кількістю пазів осердя статора розрахунок обмоткових даних та створення електричної схеми модернізованої обмотки виконуються за наведеними вище принципами. Дані принципи відображені також на рис. 6.3, 6.6, 6.7, 6.8, 6.11, 6.12, на яких представлені можливості виконання різних схем однієї з фаз трифазних обмоток двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією за будь-якої кількості пазів осердя статора зі з'єднанням конденсаторів на напругу напівфази, тобто на напругу однієї з напівобмоток.

На рис. 2.4, 2.5, 2.9, 2.10, 2.13, 2.14 наведені повні розгорнуті схеми відповідних обмоток при конкретній кількості пазів  $Z_1$  або з метою досягнення більшої наочності лише фрагменти обмотки однієї з фаз зі схемою з'єднання конденсаторів у  $\Delta$  на половину лінійної напруги мережі живлення.

Умовні позначення до табл. 2.1:

$P_n$  – номінальна потужність електродвигуна, кВт;

$I_n$  – номінальний струм, А;

$\cos \varphi_n$  – номінальний коефіцієнт потужності;

$Z_1$  – кількість пазів статора;

$y$  – крок по пазах, наприклад, 1 – 12, 2 – 11 – для концентричної обмотки ”врозвалку”; 1 – 13 або (1 – 15) – для двошарової обмотки; 1 – 10 (2<sup>1</sup> – 11<sup>1</sup>) – верхній і нижній шари;

Таблиця 5.1 – Основні номінальні та обмоткові дані електродвигунів серій 4А, АІР потужністю до 30 кВт, напругою 220/380 В, Y, частотою 50 Гц з внутрішньою ємнісною компенсацією

Тип двигуна	Базовий електродвигун									Схема внутрішньої компенсації реактивної потужності			Після компенсації		
	$P_n$ кВт	$I_n$ А	$\cos \varphi_n$	$Z_1$	Вид обмотки	$y$	$S_n$	$n/a$	$d$ мм	Реве- сивний двигун	Нереверсивний двигун		С мкФ	$I'_n$ А	$\cos' \varphi_n$
										Рис.№	Рис.№	$y$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	$2p = 2, n = 3000$ об/хв														
4A71A2	0,75	1,7	0,87	24	02	1-12 2-11	89	1/1	0,53	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	8	1,53	0,925
4A71B2	1,1	2,5	0,87	24	02	1-12 2-11	73	1/1	0,59	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	10	2,25	0,925
4A80A2	1,5	3,3	0,85	24	02	1-12 2-11	61	1/1	0,80	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	16	2,9	0,92
4A80B2	2,2	4,6	0,87	24	02	1-12 2-11	48	1/1	0,93	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	20	4,2	0,925
4A90L2	3,0	6,1	0,88	24	02	1-12 2-11	44	1/1	1,08	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	24	5,5	0,93
4A100S2	4,0	7,9	0,89	24	02	1-12 2-11	38	2/1	0,96	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	30	7,15	0,93
4A100L2	5,5	10,5	0,91	24	02	1-12 2-11	30	2/1	1,08	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	40	9,8	0,93
4A112M2	7,5	15,0	0,88	24	02	1-12 2-11	26	2/1	1,25	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	60	13,6	0,92
4A132M2	11,0	21,0	0,90	24	02	1-12 2-11	21	3/1	1,20	3а, 4а	3б, 4б	1-12 2-11	80	19,4	0,93

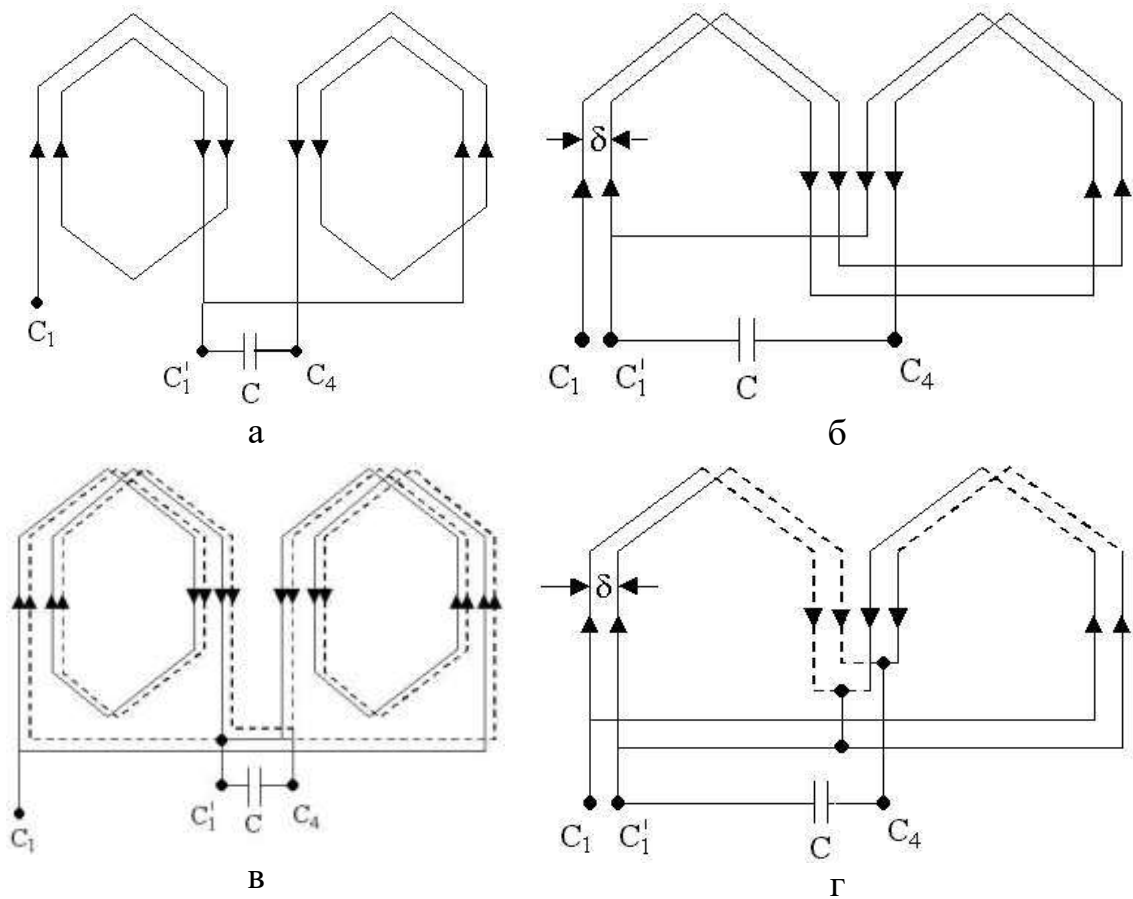


Рис. 5.3 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 2$ ,  $Z_1 = 24, 36$ :  
 а, б – одношарова "врозвалку" послідовна обмотка при  $\delta = 0$  (а) та  $\delta = 30^\circ$  (б);  
 в, г – двошарова обмотка з двох послідовно-паралельних віток при  $\delta = 0$  (в) та  $\delta = 30^\circ$  (г);  
 — — — — — одношарова обмотка або верхній шар двошарової;  
 - - - - - нижній шар двошарової обмотки

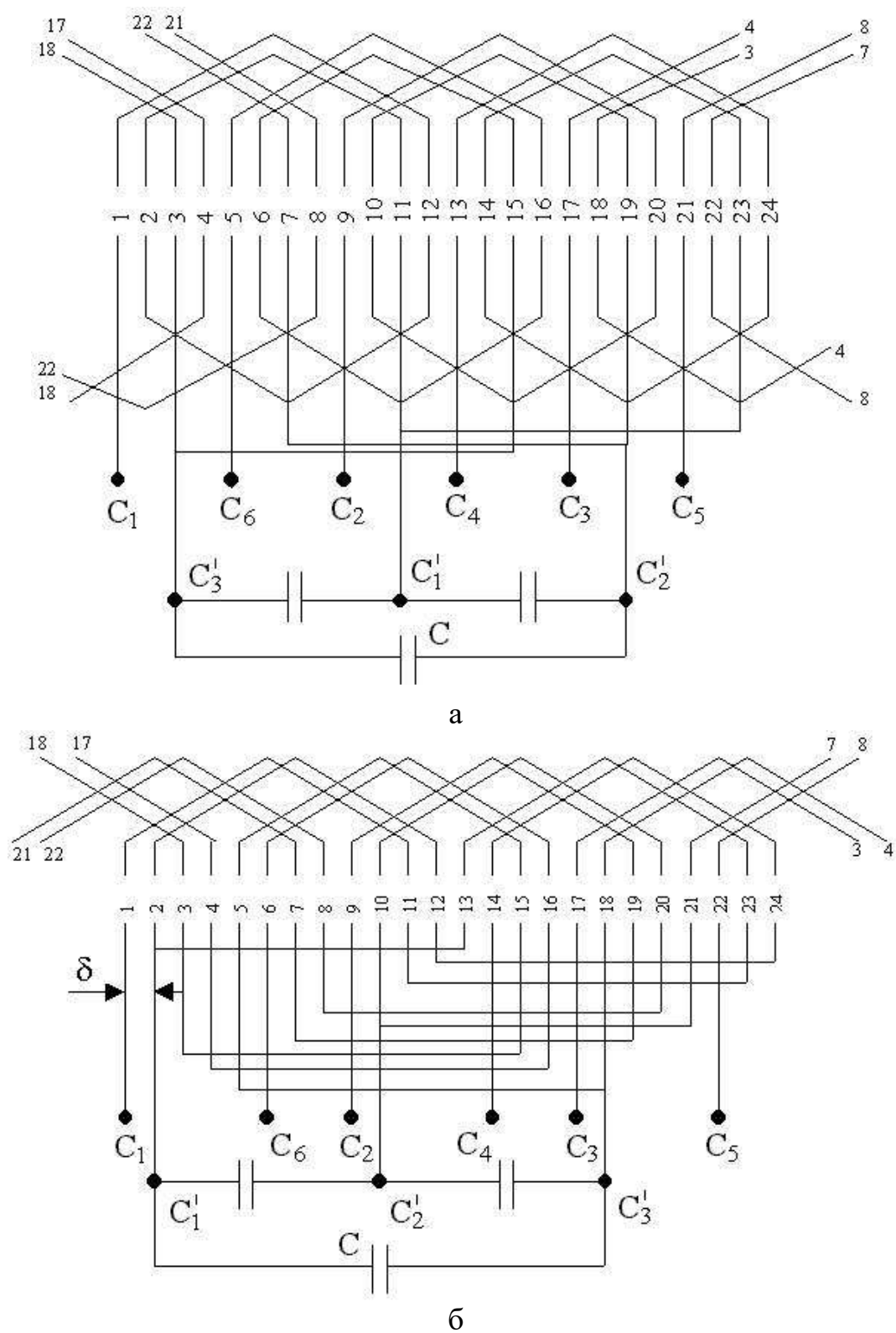
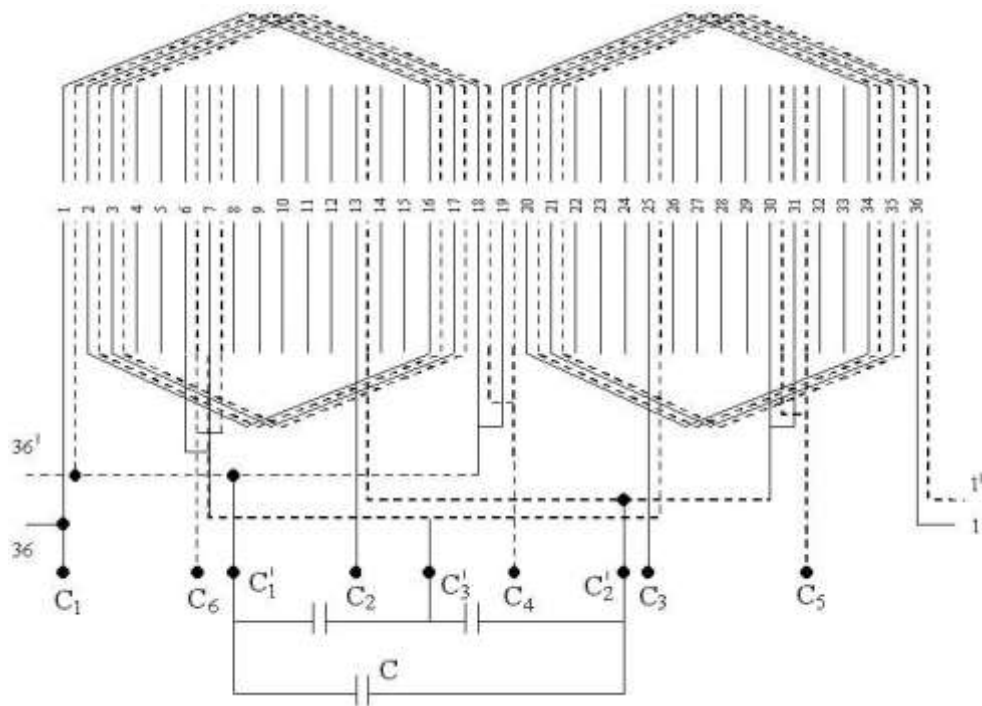


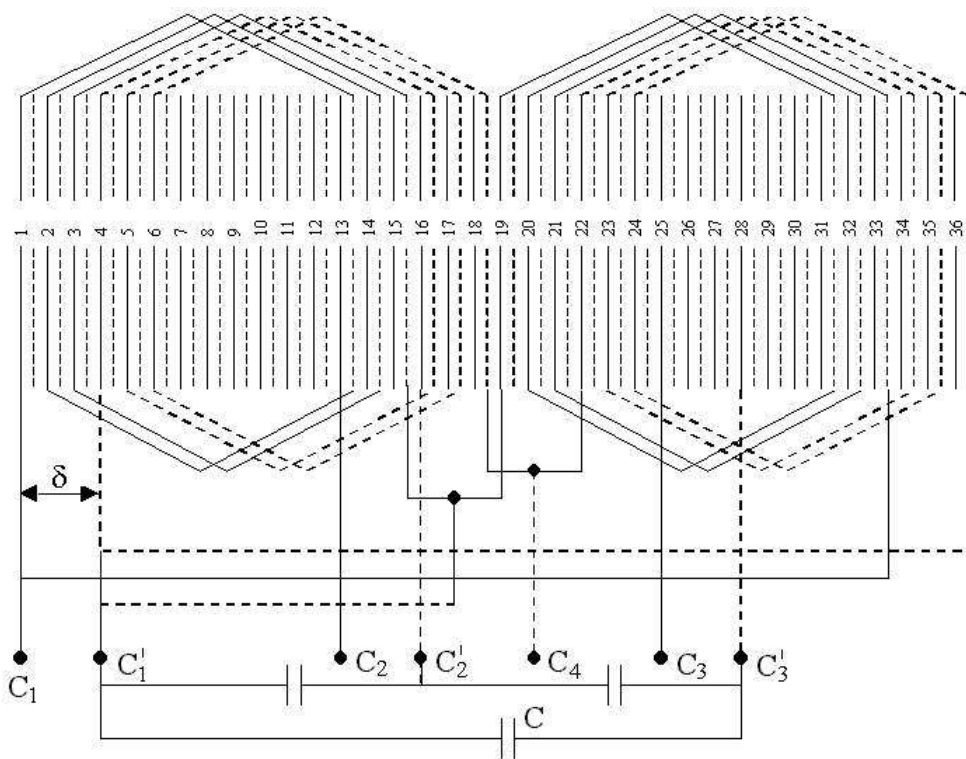
Рис. 5.4 – Розгорнуті схеми одношарових трифазних обмоток статора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 2$ ,  $Z_1 = 24$ :

а – концентрична,  $y = 1 - 12, 2 - 11, \delta = 0$ ;

б – ”врозвалку”,  $y = 1 - 11, 2 - 12, \delta = 30^\circ$



а



б

Рис. 5.5 – Фрагменти двошарової обмотки однієї фази асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 2$ ,  $Z_1 = 36$  та двох послідовно-паралельних напівобмотках:

а –  $y = 1 - 16$ ,  $\delta = 0$ ;

б –  $y = 1 - 13$ ,  $\delta = 30^\circ$

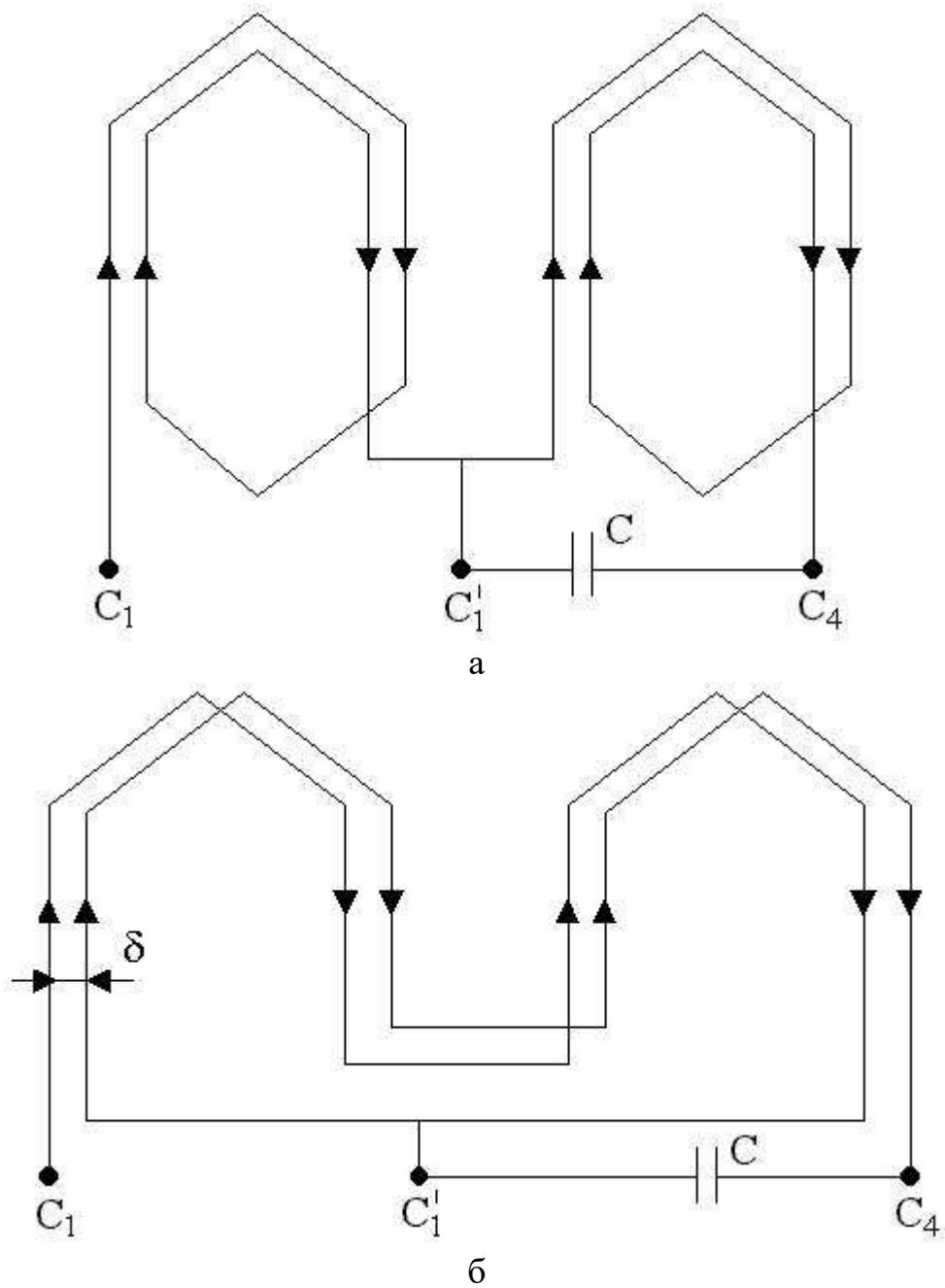


Рис. 5.6 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією одношарової послідовної обмотки з  $2p = 4$ ,  $Z_1 = 24$  при  $\delta = 0$  (а) і  $\delta \neq 0$  (б)

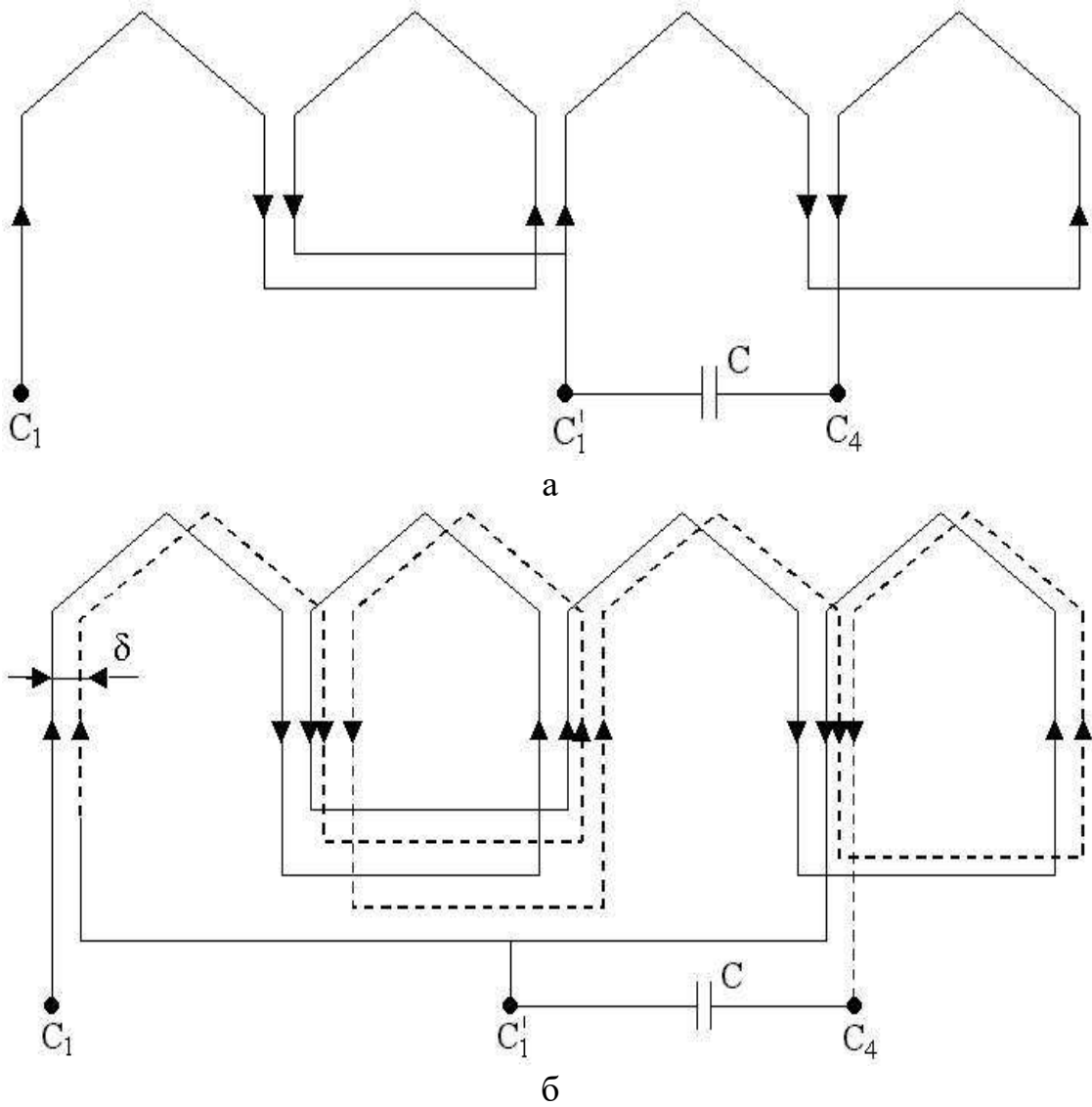
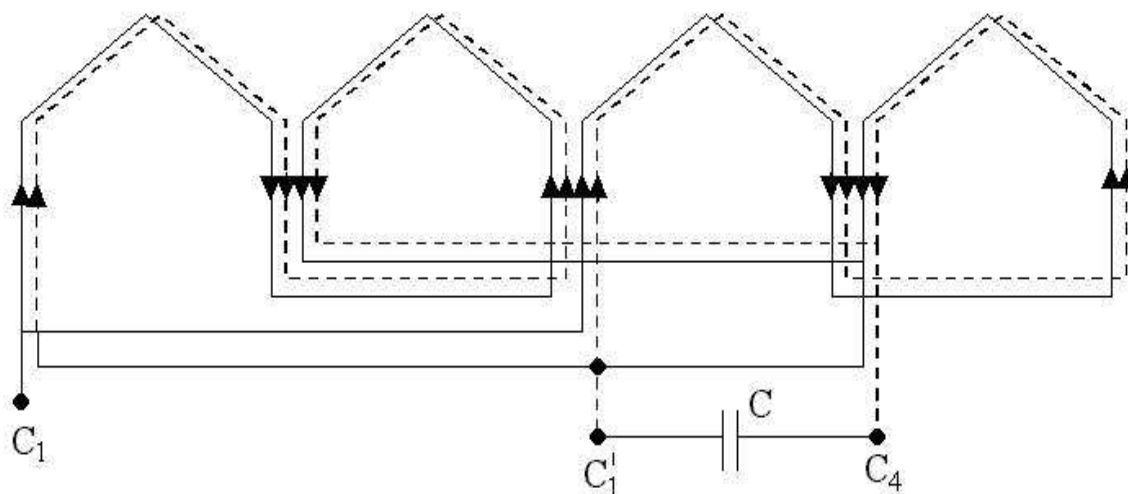
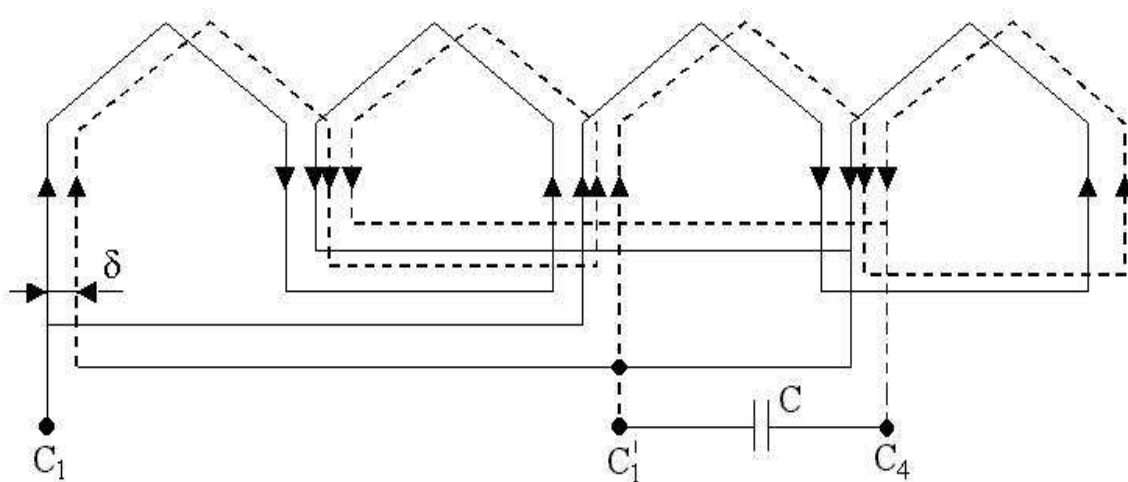


Рис. 5.7 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 4$ ,  $Z_1 = 36$ :  
 а - послідовна обмотка "врозвалку", одношарова при  $\delta = 0$ ;  
 б - двошарова при  $\delta \neq 0$



а



б

Рис. 5.8 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 4$ ,  $Z_1 = 48$ :  
 а - двошарова обмотка з двох послідовно-паралельних віток при  $\delta = 0$ ;  
 б - двошарова обмотка з двох послідовно-паралельних віток при  $\delta \neq 0$

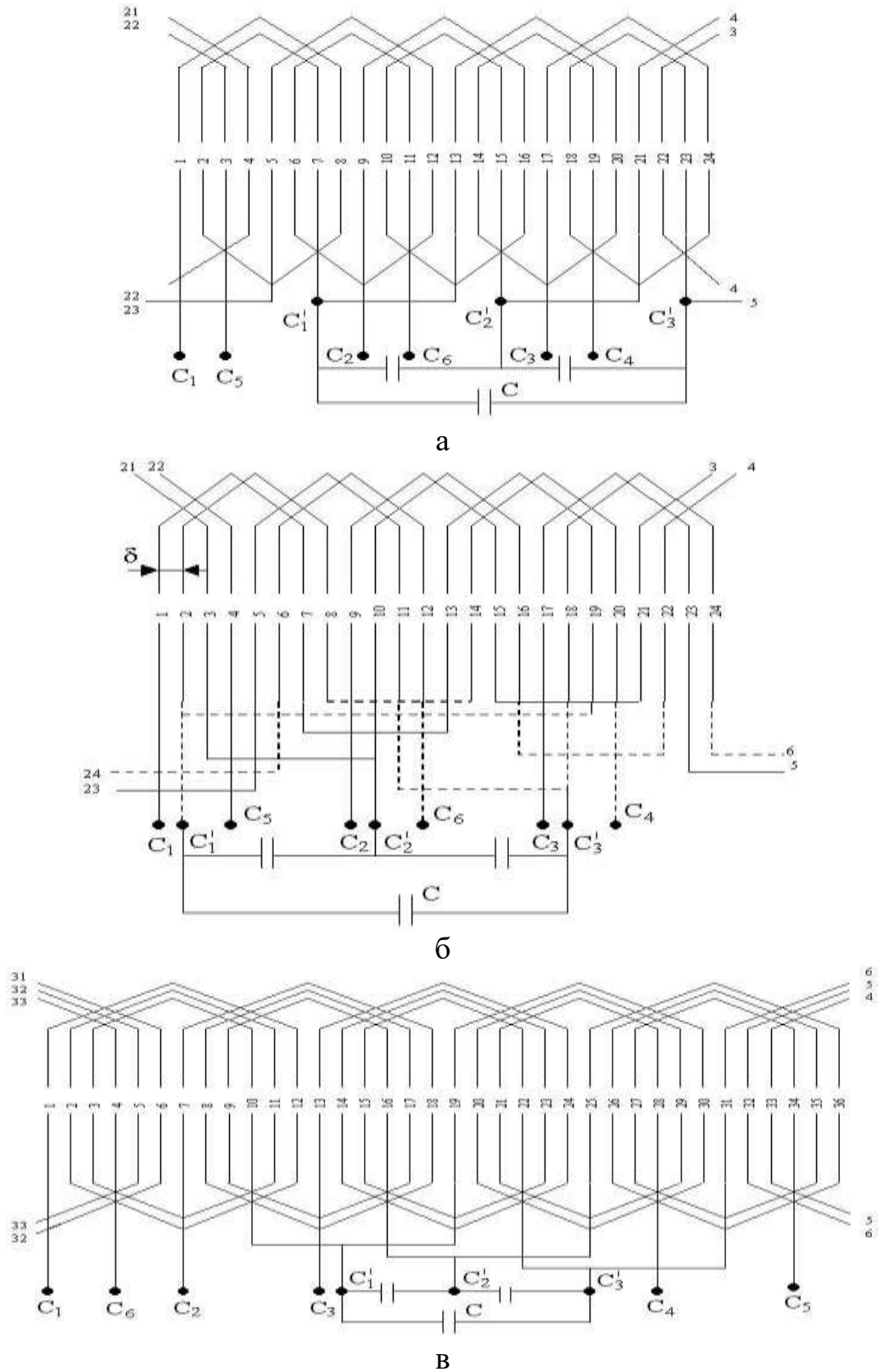


Рис. 5.9 – Розгорнуті схеми трифазних одношарових обмоток статора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 4$  :

а, в – концентрична при  $\delta = 0$  ;

б – ”врозвалку” при  $\delta = 30^0$

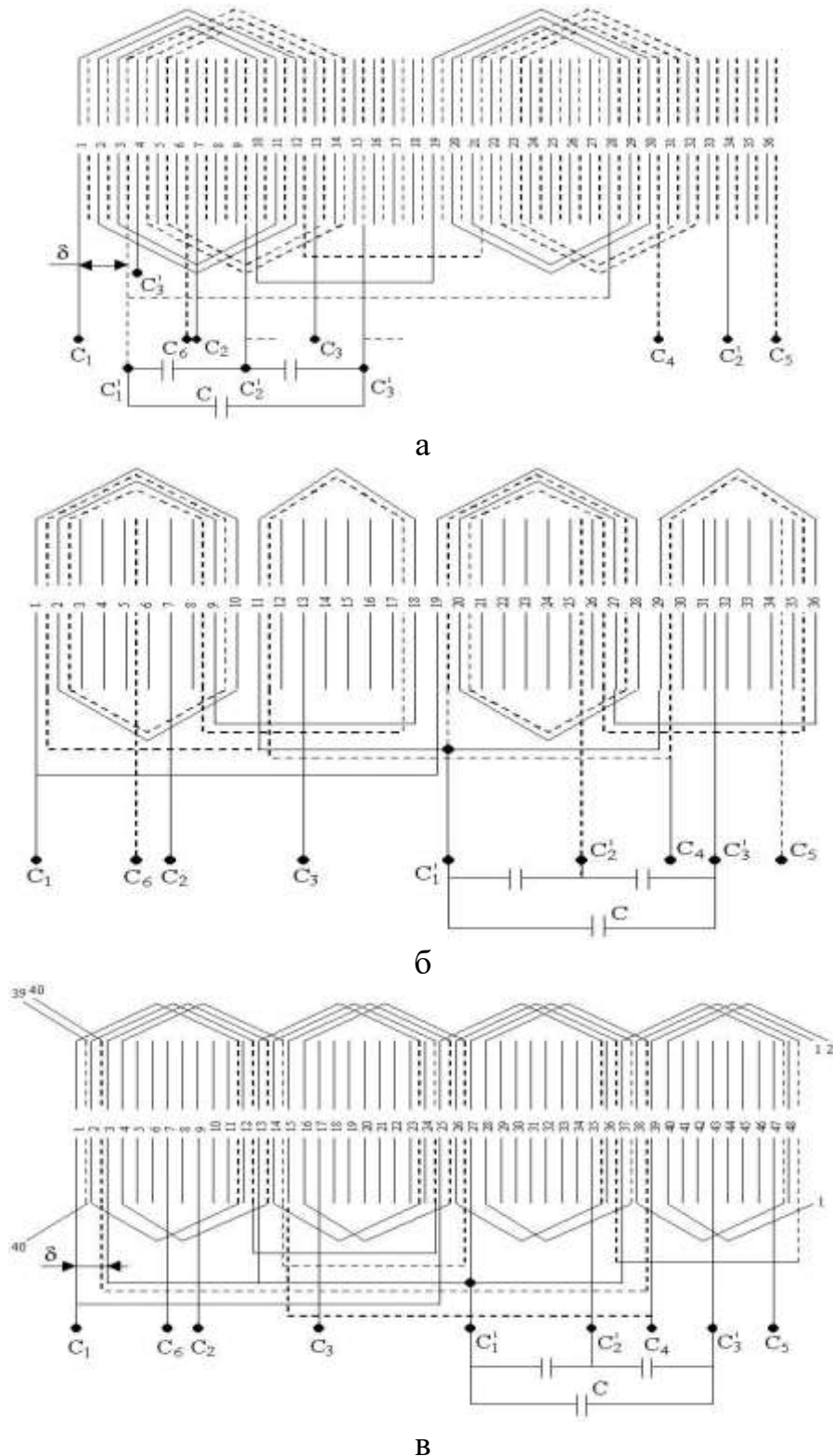


Рис. 5.10 – Фрагменти однієї фази двошарової обмотки статора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 4$ : а – двошарова концентрична при  $\delta \neq 0$  ;  
 б – двошарова обмотка з двох послідовно-паралельних віток при  $\delta = 0$  ;  
 в – двошарова обмотка з двох послідовно-паралельних віток при  $\delta \neq 0$

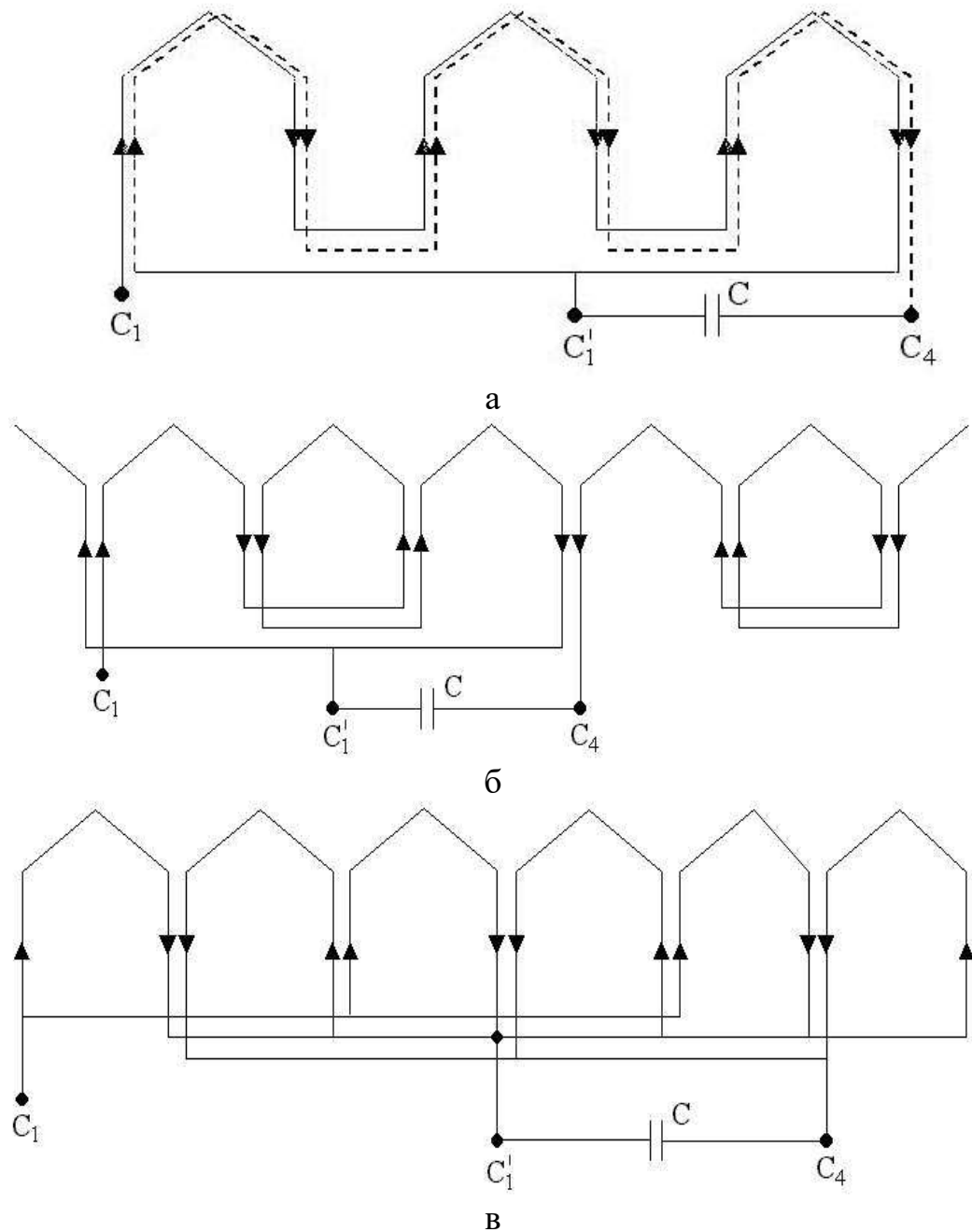


Рис. 5.11 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 6$ ,  $Z_1 = 36, 54, 72$  для реверсивних двигунів:

- а – напівобмотки, виконані одна у нижньому, друга - у верхньому шарі пазів;
- б – схема обмотки "врозвалку" з двох послідовних напівобмоток;
- в – схема обмотки з двох послідовних напівобмоток по 3 паралелі в кожній напівобмотці

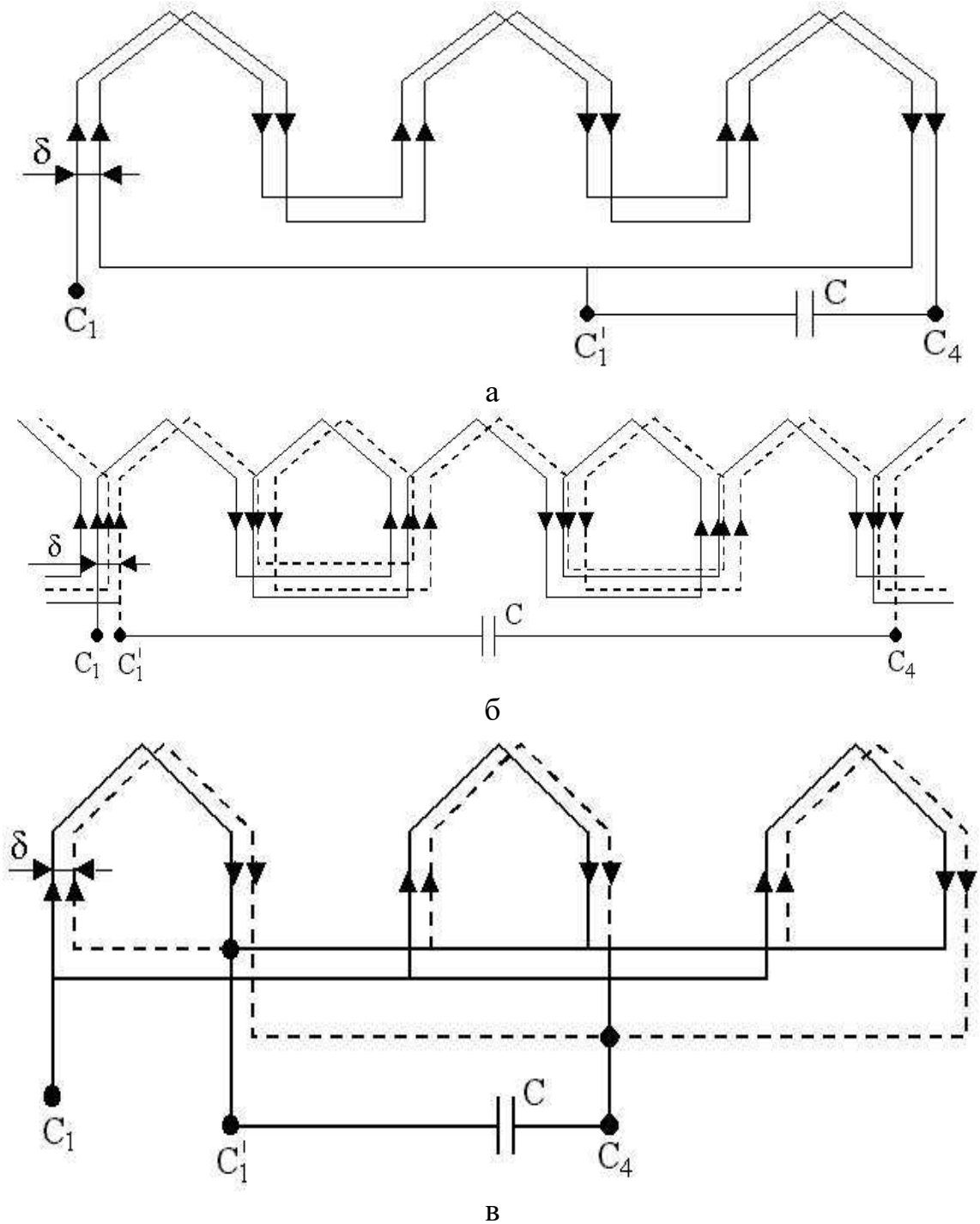
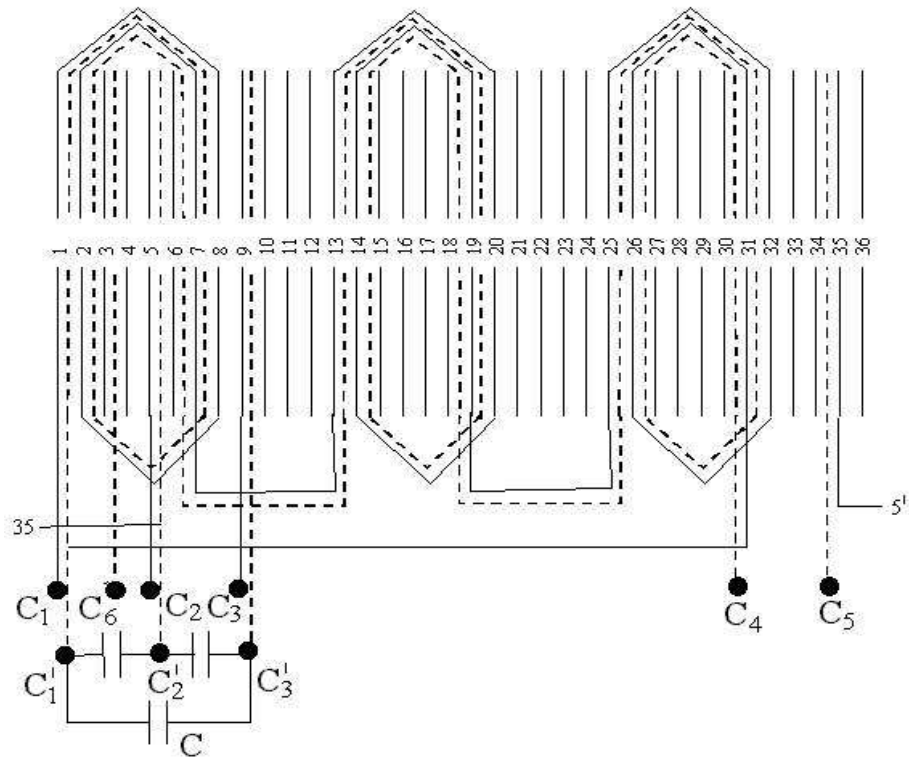
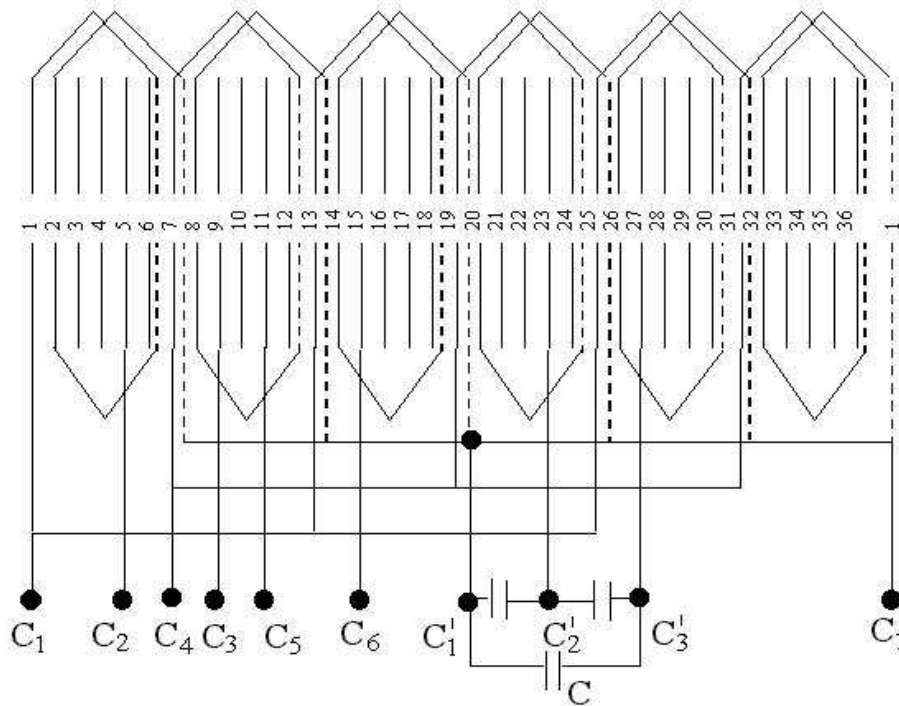


Рис. 5.12 – Принцип виконання фази обмотки статора трифазного асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 6$ ,  $Z_1 = 36, 54, 72$  для нереверсивних двигунів при  $\delta \neq 0$ :

- а – одношарова послідовна;
- б – двошарова послідовна;
- в – двошарова послідовно-паралельна



а



б

Рис. 5.13 – Фрагменти схеми однієї фази трифазних обмоток статора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 6$  для реверсивних двигунів при  $\delta = 0$ :

- а – при послідовних напівобмотках;
- б – при послідовно-паралельних напівобмотках

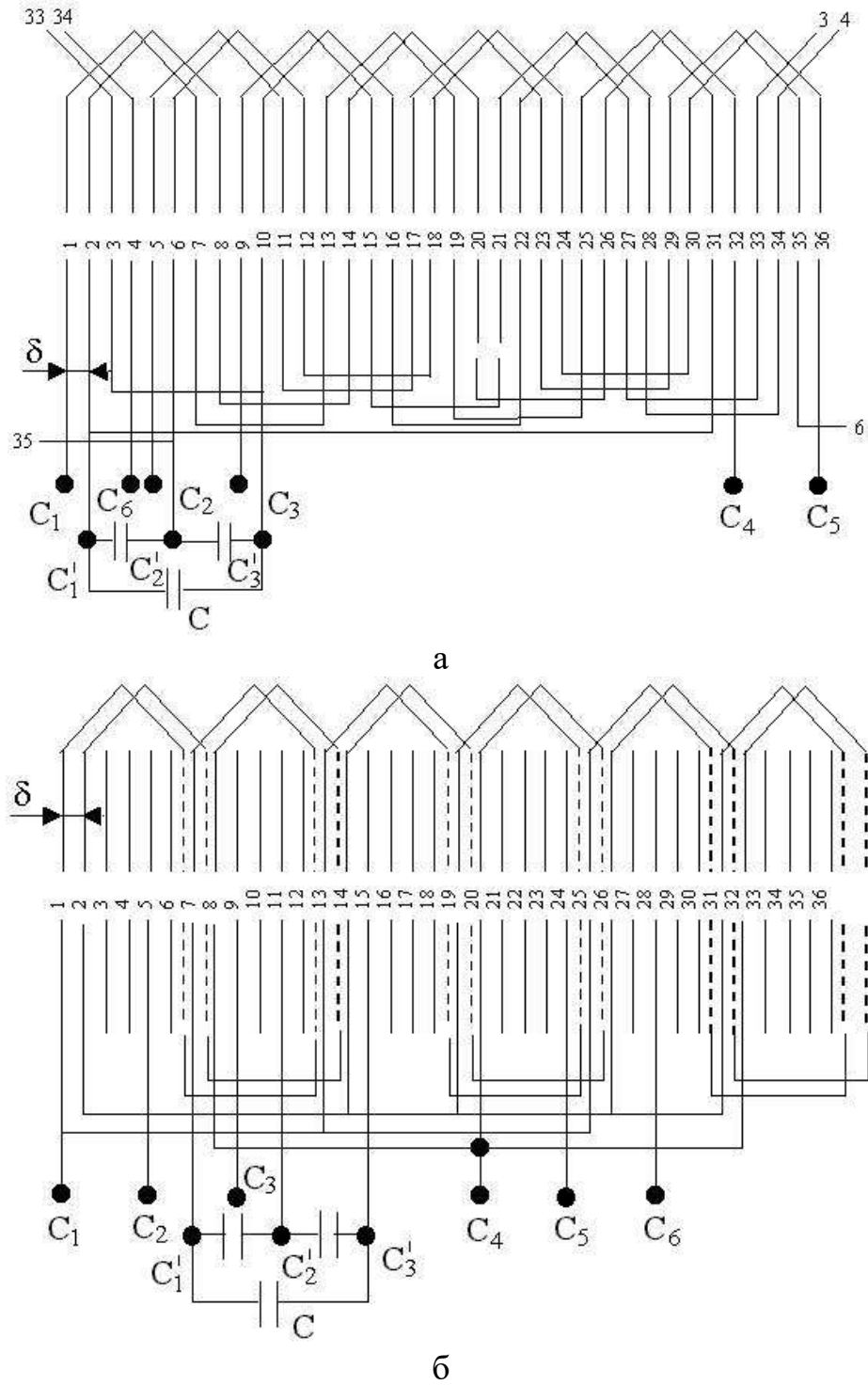


Рис. 5.14 – Розгорнуті схеми трифазних обмоток статора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією при  $2p = 6$  для неререверсивних двигунів при  $\delta \neq 0$ :

а – одношарова при послідовних напівобмотках;

б – двошарова при послідовно-паралельних напівобмотках (фрагмент однієї фази)

$S_n$  – кількість ефективних провідників у пазу;

$n/a$  – кількість елементарних провідників ( $n$ ) у одному ефективному та кількість паралельних віток ( $a$ ) обмотки;

$d$  – діаметр провідників обмотки, мм;

$c$  – ємність на фазу при з'єднанні конденсаторів у  $\Delta$ , мкФ.

Двополюсні обмотки ( $2p = 2$ ) є найбільш простими для застосування методу внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів. Обмотки малих двигунів (до 11 кВт) виконуються одношаровими при кількості пазів осердя статора  $Z_1 = 24$  у вигляді однієї послідовної вітки. Тільки в двигуні АИР 132М2 і більш потужних обмотка складається з двох паралельних віток, а, починаючи з двигунів потужністю 15 кВт, вона виконується двошаровою з вкороченим кроком (табл. 6.1). У найпростішому варіанті для малих двигунів конденсатором шунтується половина одношарової обмотки, виконаної "врозвалку" (рис. 6.3,а, 6.4,а), проте для реверсивних двигунів рекомендується виконати напівобмотки пошарово: одну в нижній частині пазів, іншу – у верхній частині тих самих пазів за тією самою схемою. Такі напівобмотки розташовуються під усіма полюсами приблизно в однакових умовах. У малих двигунах напівобмотки з'єднуються послідовно і одна з них шунтується конденсатором, у більш потужних двигунах напівобмотки кожного шару з'єднуються в дві паралельні вітки, в цілому обмотка складається з двох послідовно-паралельних віток, одна з послідовних частин якої шунтується конденсатором (рис. 6.3, в; 6.5,а).

Такі схеми можуть виконуватися для двигунів будь-якої модифікації, будь-якого призначення, в тому числі для реверсивних і неререверсивних. Проте для неререверсивних двигунів внутрішня ємнісна компенсація більш ефективна при просторовому зміщенні напівобмоток одна відносно іншої на кут  $\delta = 30^\circ$ . Такого зміщення досягають розподілом фазної зони базової обмотки на дві рівні частини та виконанням кожної напівобмотки у межах власної половини фазної зони (рис. 6.3, б, г; 6.4, б; 6.5, б).

За представленими на рис. 6.3, 6.4, 6.5 фрагментами обмоток та

принципами їх виконання можна виготовити трифазну обмотку статора при  $2p = 2$  для будь-якої кількості пазів осердя статора, для будь-якої схеми одношарової або двошарової обмотки при використанні її з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності асинхронного двигуна.

Для чотириполюсних двигунів ( $2p = 4$ ,  $n = 1500$  об/хв) основними є одношарові обмотки при  $Z_1 = 24, 36, 48$  та двошарові при  $Z_1 = 48$  (табл. 2.1). При  $Z_1 = 24, 36$  для малих двигунів серій 4А та АИ для внутрішньої ємнісної компенсації використовуються базові послідовні одношарові обмотки із шунтованою ємністю напівобмоткою під іншою парою полюсів (рис. 6.6, а; 6.7, а; 6.9, а), а для нереверсивних двигунів при  $q =$  парне число ( $Z_1 = 24$ ,  $q = 2$ ) дві одношарові послідовні напівобмотки, зміщені одна відносно іншої на кут  $\delta = 30^\circ$  (на один паз, рис. 6.6, б; 6.9, б). У такому випадку напівобмотки розташовані під усіма полюсами, а одна з них шунтується конденсатором. При  $q =$  непарне число ( $Z_1 = 36$ ,  $q = 3$ ) базова обмотка поділяється на дві напівобмотки, кожна з яких займає половину паза (верхню або нижню), кількість витків у котушці напівобмотки зменшується удвічі порівняно з базовою обмоткою. Між собою напівобмотки з'єднуються послідовно, і одна з них шунтується конденсатором. Для реверсивних двигунів напівобмотки розташовуються в одних і тих самих пазах без просторового зміщення одна відносно одної ( $\delta = 0$ ), для нереверсивних – напівобмотки зміщені між собою на кут  $\delta$  (рис. 6.10, а,  $\delta = 2\alpha = 40^\circ$ ). Якщо базова обмотка складається з двох паралельних віток, то для збереження еквівалентної кількості витків фази вона поділяється на дві послідовно з'єднані напівобмотки, кожна з яких складається з двох паралельних віток. Для реверсивних двигунів напівобмотки просторово співпадають (рис. 6.8, а; 6.10, б), для нереверсивних вони зміщуються між собою на кут  $\delta$  (рис. 6.8, б; 6.10, в). При цьому одна з напівобмоток шунтується конденсатором.

Особливістю одношарових шестиполюсних обмоток ( $2p = 6$ ,  $n = 1000$  об/хв) є наявність у них 3 котушкових груп, які в загальному випадку не можуть бути розділені на дві рівні частини. Тому для здійснення

внутрішньої ємнісної компенсації доводиться застосовувати двошаровий варіант, коли одна з напівобмоток розташована у нижньому шарі пазів, а інша – у верхньому без просторового зміщення між ними для реверсивних двигунів (рис. 6.11, а; 6.13, а) або зі зміщенням на 1-2 паза між напівобмотками для неревверсивних двигунів при  $q = \text{непарне число}$  (наприклад, при  $Z_1 = 54$ ,  $q = 3$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ, 40^\circ$  для двигунів потужністю до 11 кВт рекомендується  $\delta = 40^\circ$ , для більш потужних –  $\delta = 20^\circ$ ). При  $q = \text{парне число}$  (при  $Z_1 = 36$ ,  $q = 2$ ;  $Z_1 = 72$ ,  $q = 4$ ) фазна зона обмотки розділяється на дві рівні частини зі зміщенням між ними на  $30^\circ$  (рис. 6.12, а; 6.14, а).

Якщо обмотка виконана "врозвалку", то при цьому кількість котушкових груп збільшується до 6 з можливістю розподілу їх на дві рівні частини (рис. 6.11, б) або зі зміщенням між собою напівобмоток верхнього та нижнього шарів на кут  $\delta$  (рис. 6.12, б). При  $Z_1 = 54, 72$  для двигунів потужністю 11 кВт і більше обмотка зазвичай виконується з трьома паралельними вітками. Використовуючи схеми "врозвалку" або двошаровий варіант обмотки, отримують 6 однакових котушкових груп, з'єднаних у три паралелі в кожній з двох послідовних напівобмоток, одна з яких шунтується конденсатором (рис. 6.11, в; 6.12, в; 6.13, б; 6.14, б).

#### 5.4 Технологічні вказівки щодо виготовлення модернізованих обмоток

У всіх схемах обмоток статора двигуна, модернізованих для використання внутрішньої ємнісної компенсації, зберігаються переріз, діаметр і марка провода; кількість провідників у пазу, елементарних провідників у одному ефективному, паралельних віток базової обмотки. Виготовлення секцій обмоток здійснюється на типовому обладнанні за загальноприйнятими технологіями. Розміри секцій приймаються залежно від габаритів машини, схеми обмотки та величини її кроку (табл. 6.1).

Проте обов'язковою особливістю модернізованої обмотки є її розподіл на дві однакові напівобмотки, що в окремих випадках передбачає певні

відхилення від схем базових обмоток. У такому разі одношарова обмотка може бути пошарово поділена на дві напівобмотки, одна з яких розташовується у нижній частині пазів, інша – у верхній (наприклад, при  $q =$  непарне число) з просторовим збіганням або зміщенням напівобмоток одна відносно іншої на кут  $\delta$ . Секція такої напівобмотки має в два рази менше витків, ніж секція базової одношарової обмотки. При  $q =$  парне число фазна зона обмотки поділяється на дві частини з просторовим зміщенням напівобмоток на половину кута фазної зони. Секції такої обмотки мають ту ж кількість витків, що і у базовій обмотці.

При виконанні обмотки з двох або трьох паралельних віток паралельні вітки створюються у напівобмотках, з'єднаних послідовно між собою.

Пазова ізоляція обмотки статора виконується у такій же послідовності і тими ж самими ізоляційними матеріалами, що і при проведенні звичайного ремонту обмотки. Розподіл одношарової обмотки на два шари окремих напівобмоток вимагає застосування міжшарової ізоляції як і у двошарових обмотках. При цьому спочатку укладається напівобмотка нижнього шару, потім – верхнього.

Після укладання секцій (котушок) паяють схему обмотки. Виконання схеми обмотки передбачає з'єднання окремих котушок у напівобмотці, з'єднання паралельних віток у напівобмотці, послідовне з'єднання між собою напівобмоток у фазу. На клемний щиток виводяться початки фаз  $C_1, C_2, C_3$ , через які здійснюється живлення електродвигуна від мережі, та середні точки  $C'_1, C'_2, C'_3$  для підключення конденсаторів. Кінці  $C_4, C_5, C_6$  з'єднуються у загальний вузол нульової точки. Вивід середніх точок та під'єднання конденсаторів здійснюється проводом, розрахованим на величину реактивного струму двигуна  $I_p = I_n \sin \varphi_n$ , що при  $\cos \varphi_n = 0,7 \div 0,9$  відповідає  $\sin \varphi_n = 0,7 \div 0,45$ . Тому переріз цього провoda повинен становити 0,7 від перерізу провoda обмотки у малих двигунах і не менше 0,45 у двигунів середньої потужності, стосовно діаметру провoda дані співвідношення відповідають величинам 0,85 – 0,7.

## 5.5 Післяремонтні випробовування

Відремонтовані модернізовані електродвигуни підлягають контрольним випробовуванням і перевіркам згідно з програмою приймально-здавальних випробовувань.

При контрольних випробовуваннях модернізованих двигунів конденсатори внутрішньої ємнісної компенсації мають бути відключеними, тому вимоги і норми випробовувань, їх обсяг і послідовність, види перевірок мають бути такими самими як і для базових серійних двигунів. Проводяться наступні види контрольних випробовувань і перевірок:

- зовнішній огляд, перевірка якості збирання і комплектності;
- вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками;
- вимірювання опору обмоток на постійному струмі у майже холодному стані;
- випробовування ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками на електричну міцність;
- випробовування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність;
- визначення струму холостого ходу;
- визначення струму короткого замикання;
- перевірку маркування вивідних кінців обмоток для підключення до мережі живлення і середніх точок обмоток для під'єднання конденсаторів;
- перевірку комплектності конденсаторів, їх встановлення, відповідність конденсаторів величині розрахункової ємності та напруги.

Допустиме значення струмів холостого ходу та пускових струмів електродвигунів мають відповідати їх величинам у базових двигунах без конденсаторів. При вмиканні конденсаторів струм холостого ходу має бути меншим ніж у базового двигуна на 30 – 40%, пусковий струм має зменшуватися на 10 – 12%.

## 5.6 Вибір і встановлення конденсаторів

Величина ємності конденсаторів на фазу має відповідати вказаним у табл. 6.1 значенням. Конденсатори підключаються за схемою  $\Delta$  до

середніх точок обмотки, виведених на клемний щиток. Номінальна напруга конденсаторів має бути:  $U_{нк} \geq \frac{\sqrt{2}U_{л}}{2}$ . Так, при лінійній напрузі мережі живлення  $U_{л} = 380$  В конденсатори мають бути вибрані на напругу  $U_{нк} = 400$  В.

Батарея конденсаторів комплектується з банок стандартних паперово-масляних конденсаторів типу МБМ, МБГП, МБТ та ін. Конденсатори встановлюються у металічний або пластмасовий корпус з ущільненнями, які відповідають ступеню захисту електродвигунів, для яких вони призначені. Комплект конденсаторів кріпиться на корпусі двигуна біля клемного щитка (рис. 6.15) або встановлюється біля двигуна на ізоляційній підставці. Конденсатори не повинні мати відкритих струмоведучих з'єднань. Металічний корпус конденсаторів має бути приєднаний до того ж заземлювача, що і корпус двигуна.

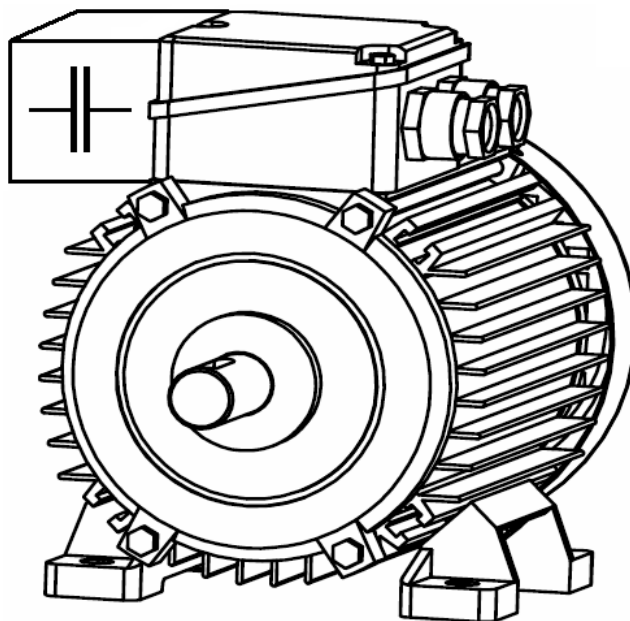


Рис. 5.15. Схема розташування конденсаторів на асинхронному двигуні

## РОЗДІЛ 6

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Економічний ефект від впровадження технології внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних електродвигунів на виробничих дільницях ТОВ «Біофарма Плазма» досягається за рахунок зниження втрат у мережі живлення, зменшення плати за перетоки реактивної електроенергії та підвищення енергоефективності технологічного обладнання.

Споживачі електроенергії вносять плату за спожиту активну електроенергію і втрати у споживчій мережі до точки обліку згідно з діючими тарифами. При використанні технологічної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів втрати активної електроенергії у мережі живлення зменшуються на 30-35%, відповідно зменшується плата за спожиту активну електроенергію.

Як визначено діючою методикою розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між електропостачальною організацією та її споживачами користувачі електричної енергії мають вносити плату за споживання і генерацію реактивної електроенергії. Величина плати визначається трьома складовими:

$$П = П1 + П2 - П3,$$

де  $П1$  - основна плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії;

$П2$  - надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності (КРП);

$П3$  - знижка плати за споживання і генерацію реактивної електроенергії у разі участі споживача в оптимальному добовому регулюванні режимів мережі енергопостачальної організації в розрахунковий період.

Основна плата за спожиту і генеровану реактивну електроенергію для споживачів визначається формулою:

$$П1 = \sum^n (wQ_{cn} + K \cdot wQ_e) \cdot D \cdot T, \text{ грн.},$$

де  $n$  - число точок розрахункового обліку реактивної енергії;

$wQ_{cn}$  - споживання реактивної енергії в точці обліку за розрахунковий період, квар·год;

$wQ_e$  - генерація реактивної енергії в мережу енергопостачальної організації в

точці обліку за розрахунковий період, квар·год;

$K = 3$  - нормативний коефіцієнт урахування збитків енергопостачальної організації від генерації реактивної електроенергії з мережі споживача;

$D$  - економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП), що характеризує частку впливу реактивного перетоку в точці обліку на техніко-економічні показники в розрахунковому режимі, кВт/квар;

$T$  - середня вартість активної електроенергії за розрахунковий період, грн./кВт·год.

Значення ЕЕРП, базового коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень в засоби КРП і коефіцієнта збитків від генерації реактивної потужності із мережі споживача обумовлюються Договором на поставку електроенергії (ДПЕ).

Надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності визначається формулою:

$$П2 = П1 \cdot C_{\text{баз}} (K_{\varphi} - 1), \text{ грн.}, \quad (6.1)$$

де  $П1$  - сумарна основна плата;

$C_{\text{баз}}$  - нормативне базове значення коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень в засоби КРП в електричних мережах споживача;

$K_{\varphi}$  - коефіцієнт, що вибирається з Методики розрахунку плати за споживання і перетоки реактивної потужності залежно від фактичного коефіцієнта реактивної потужності споживача  $\text{tg}\varphi$  в середньому за розрахунковий період.

У таблицях цієї Методики введено зони нечутливості надбавки до споживання реактивної потужності, які обмежені значеннями коефіцієнтів потужності:

- для промислових та прирівняних до них споживачів, залізничного і міського електротранспорту -  $\cos\varphi_2 = 0,97$  ( $\text{tg}\varphi_2 = 0,25$ );
- для непромислових, у тому числі сільськогосподарських, споживачів -  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\text{tg}\varphi_2 = 0,75$ ).

Надбавка починає діяти, якщо фактичний коефіцієнт потужності менший наведених значень  $\cos\varphi_2$ .

Фактичний коефіцієнт потужності споживача в середньому за розрахунковий період визначається формулою:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{wQ_{cn}}{wP},$$

де  $wP$  - споживання активної електроенергії за розрахунковий період, кВт·год;

$wQ_{cn}$  - споживання реактивної електроенергії за той же період, квар·год.

Знижка плати за споживання та генерацію реактивної електроенергії можлива за умов достатнього оснащення електричної мережі споживача засобами КРП, наявності зонного обліку спожитої і генерованої електроенергії, виконання споживачем обумовленого енергопостачальною організацією добового графіка споживання і генерації електроенергії та наявності його оперативного контролю. Графіки споживання і генерації та розміри знижки обумовлюються в ДПЕ.

Застосування технологічної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів забезпечує зменшення споживаної асинхронним двигуном реактивної електроенергії та зниження плати за її перетоки.

Вихідні дані для визначення економічної ефективності використання технологічної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів ремонтної майстерні наведені у табл. 1. Приймаємо точку обліку енергії на шинах нижчої напруги трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ, що живить ремонтно-технічну ділянку електрообладнання підприємства ТОВ «Біофарма Плазма».

Потужність споживана окремим двигуном становить:

$$\text{активна } P_{li} = \frac{P_{ni}}{\eta_{ni}} \cdot k_{zi}, \text{ кВт; реактивна } Q_{li} = \left[ \frac{P_{ni}}{\eta_{ni}} \operatorname{tg} \varphi_{ni} - Q_{xxi} \right] \cdot k_{ci}^2, \text{ квар,}$$

де  $P_{ni}$  - номінальна потужність і-го двигуна, кВт;

$\eta_{ni}$  - номінальний коефіцієнт корисної дії і-го двигуна;

$k_{zi}$  - коефіцієнт завантаження і-го двигуна;

$$Q_{xxi} = \frac{P_{ni}}{\eta_{ni}} \cdot \left[ \operatorname{tg} \varphi_{ni} - \frac{1}{1,25 \cdot k_{zi} - \operatorname{tg} \varphi_{ni}} \right] - \text{реактивна потужність холостого ходу і-го двигуна,}$$

квар;

Таблиця 6.1

Вихідні дані для визначення ефективності внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів ремонтно-технічної дільниці ТОВ «Біофарма Плазма»

№ п/п	Тип	$P_{нв}$ кВт	$I_{нв}$ А	$\cos\varphi_n$	$\eta_n$ %
1	2	3	4	5	6
1	АИР80В2У3	2,2	4,7	0,87	83
2	АИР71В6У3	0,55	1,74	0,71	67,5
3	АИР132S4У3	7,5	15,1	0,86	87,5
4	АИР132S4У3	7,5	15,1	0,86	87,5
5	АИР71А4У3	1,1	1,7	0,7	70,5
6	АИР80В6У3	1,5	3,05	0,74	74
7	АИР80В4У3	1,5	3,6	0,84	77
8	4АК250М6У3	0,37	1,1	0,87	90,5
9	АИР63В6У3	0,37	1,2	0,69	68
10	АИР56В2У3	0,25	0,74	0,77	68
11	АИР71В6У3	0,55	1,74	0,71	67,5
12	АИР90L2У3	2,2	5	0,8	83
13	АИР100S4У3	3	6,7	0,85	82
14	АИР132S4У3	7,5	15,1	0,86	87,5
15	АИР132S4У3	7,5	15,1	0,86	87,5
16	АИР132М6У3	7,5	16,5	0,81	85,5
17	АИР71В2У3	1,1	2,5	0,85	77,5
18	АИР100L4У3	4	8,6	0,84	84
19	АИР56В2У3	0,18	0,66	0,64	64
20	АИР112М4У3	5,5	11,5	0,85	85
21	АИР112М4У3	5,5	11,5	0,85	85
22	АИР71В6У2	0,55	1,74	0,71	67,5
23	АИР80В2У2	1,1	3,05	0,74	74
24	АИР100L4У3	2,2	5,65	0,76	81
25	АИР100L4У3	2,2	5,65	0,81	83
26	АИР80А4У3	1,1	2,75	0,75	81
27	АИР56А4У3	0,12	0,44	0,66	63
28	АИР100L4У3	2,2	5,65	0,81	83
29	АИР63А4У3	0,25	0,85	0,63	68
1	2	3	4	5	6
30	АИР71А4У3	0,55	1,69	0,7	70,5
31	АИР71А4У3	0,55	1,69	0,7	70,5
32	АИР80А6У3	0,75	2,26	0,72	70
33	АИР71А4У3	0,55	1,69	0,7	70,5
34	АИР71В4У3	0,75	2,14	0,73	73
35	АИР71В6У3	0,55	1,74	0,7	68
36	АИР71А6У3	0,37	1,31	0,65	65
37	АИР56В2У3	0,37	1,26	0,86	64
38	АИР80А6У3	0,55	2,26	0,72	80
39	АИР63А4У3	0,25	0,83	0,67	68
40	АИР71В4У3	0,75	2,17	0,73	72
41	АИР80А4У3	1,1	2,75	0,81	75
42	АИР71А4У3	0,75	2,17	0,73	72
43	АИР71А4У3	0,55	1,69	0,7	70,5

Потужність, споживана усіма двигунами ремонтної майстерні, дорівнює:

$$\text{активна } P_1 = \sum_{i=1}^{21} P_{1i}, \text{ кВт}; \quad \text{реактивна } Q_1 = \sum_{i=1}^{21} Q_{1i}, \text{ квар.}$$

Сумарні втрати активної потужності у провідниках живлення двигунів обчислюються за формулою:

$$\Delta P_{np} = 3 \sum_{i=1}^{21} \left( \frac{P_{ni} \cdot \frac{k_{ni}}{\eta_{ni}}}{\sqrt{3} U_n} \right)^2 \cdot R_{npi}, \text{ кВт.}$$

Потужність на вводі у ремонтну майстерню дорівнює:

$$\text{активна } P_g = P_1 + \Delta P_{np}, \text{ кВт}; \quad \text{реактивна } Q_g = Q_1, \text{ квар.}$$

$$\text{повна } S_g = \sqrt{P_g^2 + Q_g^2}, \text{ кВА.}$$

$$\text{Струм на вводі у ремонтну майстерню складає: } I_g = \frac{S_g}{\sqrt{3} U_n} \cdot 10^3, \text{ А.}$$

Втрати у провідниках вводу (від опори до розподільчого щита майстерні) становлять:

$$\Delta P_g = 3 \cdot I_g^2 \cdot R_g \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де  $R_g$  - опір провідників вводу, Ом.

Втрати у лінії (від підстанції до майстерні) складають:

$$\Delta P_l = 3 \cdot I_g^2 \cdot R_l \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де  $R_l$  - опір лінії, Ом.

Отже, сумарна споживана асинхронними двигунами майстерні потужність становить:

$$P_{сум} = P_1 + P_g + P_l, \text{ кВт.}$$

Середній час роботи асинхронних двигунів ремонтної майстерні за добу буде становити 5,1 год., а за рік –  $5,1 \cdot 365 = 1861$  год.

Таким чином, річне споживання електроенергії асинхронними двигунами ремонтної майстерні становитиме:

$$\text{активної } wP = P_{сум} \cdot 1861, \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \text{реактивної } wQ = Q_1 \cdot 1861, \text{ квар} \cdot \text{год.}$$

Коефіцієнт потужності майстерні визначається за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{wP}{\sqrt{wP^2 + wQ^2}}$$

Плата за спожиту асинхронними двигунами майстерні активну електроенергію становить:

$$P_a = wP \cdot T, \text{ грн.},$$

де  $T = 0,33$  - середня вартість активної електроенергії за розрахунковий період, грн/(кВт·год).

Розраховуючи плату за перетоки реактивної електроенергії приймаємо  $Q_s = 0$ , оскільки генерація реактивної електроенергії у мережу електропостачальної організації в точці обліку за розрахунковий період відсутня. У відповідності із Методикою для низьковольтної розподільчої мережі економічний еквівалент реактивної потужності буде рівним  $D = 0,125$  кВт/квар.

Результати розрахунку ефективності застосування внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів зведені в табл. 8.2.

## Таблиця 6.2

Результати розрахунку ефективності впровадження внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів ремонтної ділянки підприємства ТОВ «Біофарма Плазма

Показник	Без компенсації	З компенсацією
Споживана асинхронними двигунами активна потужність, кВт	48,94	48,94
Споживана асинхронними двигунами реактивна потужність, квар	32,06	6,320
Втрати активної потужності у провідниках живлення двигунів, кВт	0,946	0,67
Загальний струм споживаний асинхронними двигунами, А	90,09	75,3
Коефіцієнт потужності рем. майстерні	0,67	0,993
Втрати активної потужності у провідниках вводу, кВт		
Втрати активної потужності у мережі живлення (до ТП), кВт	0,779	0,545
Загальне споживання активної електроенергії за розрахунковий період, тис. кВт·год	2,72	1,9
Загальне споживання реактивної електроенергії, тис. квар·год	99,36	96,14

Плата за спожиту активну електроенергію, грн.	59,66	15,73
Основна плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії, грн.	17620	17050
Надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами КРП, грн.	2522	260
Плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії, грн.	489	23
Загальна плата за спожиту електроенергію, грн.	3011	283
	20631	17333

При проведенні розрахунку не враховувалось зменшення втрат активної електроенергії у трансформаторній підстанції та мережі від точки обліку до джерела живлення.

Розрахунки (табл. 7.2) показують, що при використанні технологічної компенсації асинхронних електродвигунів ремонтної майстерні річне споживання активної електроенергії зменшується на 3220 кВт·год (на 3,2%) і становитиме 96140 кВт·год, також суттєво знизиться споживання реактивної електроенергії з 59660 квар·год до 15730 квар·год (на 73,7%).

Транспортні втрати активної потужності у мережі живлення (від двигунів до шин нижчої напруги трансформаторної підстанції) зменшуються на 30% і становитимуть 1,9 кВт.

Основна плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії асинхронними двигунами майстерні зменшиться з 2522 грн. до 260 грн., тобто на 2262 грн.

Розрахунками встановлено, що за рахунок використання технологічної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів ремонтної майстерні загальна річна плата за спожиту електроенергію зменшиться на 3298 грн. (15,9%).

Отримані результати підтверджують економічну доцільність упровадження технології внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів на ремонтно-технічній ділянці ТОВ «Біофарма Плазма». Реалізація цієї технології забезпечує зниження витрат на електроенергію, підвищення енергоефективності обладнання та відповідає принципам раціонального енергоспоживання фармацевтичного виробництва.

Впровадження розробленої технології дозволяє підприємству ТОВ «Біофарма Плазма» знизити сумарне споживання реактивної енергії майже на 74%, що веде до зменшення витрат на оплату електроенергії та покращення показників енергетичної ефективності підприємства.

## БЕЗПЕКА ПРАЦІ

### Перелік основних нормативних документів

1. Закон України "Про охорону праці". Постанова Верховної Ради України від 14.11.92 №2595-ХІІ.
2. Закон України "Про пожежну безпеку" Постанова Верховної Ради України від 17.12.93 №3747-ХІІ.
3. Закон України "Про дорожній рух". Постанова Верховної Ради України від 28.01.93.
4. Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення" Постанова Верховної Ради України від 24.02.94
5. ГОСТ 12.1.009-76 ССБТ "Электробезопасность. Термины и определения".
6. ССБП ДСТУ 2293-93. "Система стандартів безпеки праці. Терміни та визначення".
7. ДСТУ 2272-93 Пожежна безпека. Терміни та визначення.
8. ДБН А 3.1-3-94. Прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів.
9. Єдина державна система показників обліку умов і безпеки праці. Затверджена наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 31.03.94 №27.
10. НАПБ А.01.001.-95. Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом МВС України від 22.06.95 №400, зареєстровані в Мін'юсті України 14.07.95 за №219/95.
11. Типове положення про службу охорони праці: затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 03.08.93 № 73, зареєстроване в Мін'юсті України 30.09.93 за № 140.
12. ДНАОП 0.00-4.12-94. Типове положення про навчання, інструктажі перевірку знань працівників з питань охорони праці, затверджене наказом Держнаглядохоронпраці України від 04.04.94 №30, зареєстровано в Мін'юсті України 12.05.94 за №95/309.
13. Положення про медичний огляд працівників певних категорій: затв. наказом

- Міністерства охорони здоров'я України від 31.03.94 № 45, зареєстроване в Мін'юсті України 21.06.94 за № 136/345.
14. Положення про розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на підприємствах, установах і організаціях: затв. постановою Кабінету Міністрів України від 10.08.93 №623.
  15. ДНАОП 0.00-4.26-96. Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту. Зареєстровано в Мінюсті України 18.11.96 №667/1692. Введене в дію 29.11.96.
  16. ДНАОП 0.03-3.30-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. Зареєстровано в Мін'юсті України 29.08.96 №488/1513. Введене в дію 29.11.96.
  17. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
  18. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей /Минэнерго СССР. - 14-е изд. перераб. и доп. с изменениями №1 и №2. РД 34.20.501. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 288с.
  19. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів /Держенергонагляд України.: - К.: Дисконт, 1995. - 260с.
  20. Правила технічної експлуатації тепловикористовуючих установок і теплових мереж / Держенергонагляд України.: - К.: Дисконт. 1995. - 81с.
  21. Правила безпечної експлуатації електроустановок. ДНАОП 1.1.10-.01-97. Держнагляд охорони праці України. - К.: Основа, 1997. - 265 с.
  22. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00.1.21.-98. Держнагляд охорони праці України.: - К.: Основа. 1998. - 380с.
  23. ГКД 34.03.103-96. Система управління охороною праці в Міненерго України. Положення затверджене Міненерго України 24.04.96.
  24. ГКД 34.12.102-95. Навчання, інструктаж та перевірка знань працівників підприємств, установ і організацій Міненерго України з питань охорони праці та експлуатації обладнання. Положення.

25. Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках / ПО Союзтехэнерго. - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. 1983. - 64с.
26. Инструкция по оказанию первой помощи пострадавшим в связи с несчастными случаями при обслуживании энергетического оборудования / Упр. по техн. безопасности и пром. санитарии Минэнерго СССР. - М.: Энергоатомиздат. 1987. - 64с.
27. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -56с.
28. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах і в організаціях енергетичної галузі України.
29. Правила безпечної роботи з інструментом та пристроями. ДНАОП 1.1.10-1.04.-01. Держенергонагляд України.: - К.: Форт, 2001. - 176 с.

#### Аналіз стану безпеки праці на підприємстві

Від рівня кваліфікації і ретельності виконання електромонтерами вимог електробезпеки під час монтажу та експлуатації електроустановок залежить безпека виробничого персоналу, технологічного обладнання та якості продукції підприємства..

Розроблена технологія ремонту асинхронних двигунів передбачає дотримання вимог безпеки праці згідно з нормативами GMP та охорони праці у фармацевтичній промисловості.

З безпекою праці тісно пов'язані пожежна безпека та блискавкозахист, оскільки пожежі, які виникають на виробництві, а також грозові розряди, загрожують не лише матеріальним цінностям, але і життю людей.

З урахуванням стану охорони праці в господарстві в проекті розроблені заходи щодо усунення небезпечних та шкідливих виробничих факторів, вибрані необхідні індивідуальні засоби захисту, виконаний розрахунок заземлюючого пристрою споживчої трансформаторної підстанції, блискавкозахисту ПТО І РЕО, вибрані засоби пожежегасіння.

В даний час На підприємстві ТОВ «Біофарма Плазма» приділяється значна увага питанням охорони праці, створенню оптимальних умов праці, відпочинку.

На кожному виробничому об'єкті призначаються відповідальні з правил техніки безпеки.

Перед зарахуванням на роботу, а також періодично проводяться заняття, інструктажі з охорони праці в спеціально обладнаному класі. Інструктажі проводяться також безпосередньо на робочих місцях. Кожен рік електромонтери здають іспит з правил техніки безпеки, на основі чого їм присвоюється кваліфікаційна група з ПТЕ і ПТБ.

Особи, що працюють з шкідливими речовинами, періодично проходять медичний огляд.

Робітники забезпечуються спецодягом та захисними засобами. Однак, порушення правил техніки безпеки все ще трапляються, що нерідко призводить до травматизму людей, зниження їх працездатності.

Тому, в господарстві необхідно більше уваги приділяти охороні праці, навчанню людей, підвищенню контролю відповідальних осіб за дотриманням правил техніки безпеки на виробництві.

Ремонтно-технічна дільниця електрообладнання фармацевтичного виробництва (ремонтна майстерня ТОВ «Біофарма Плазма») має побутові та виробничі приміщення, що загалом забезпечують комфортні умови праці та відпочинку персоналу.

Характеристика виробничих приміщень пункту за вибухо- і пожежонебезпекою, вогнестійкістю та ймовірністю ураження електричним струмом наведена в таблиці 7.1.

### Категорії та класи виробничих приміщень майстерні

Найменування приміщення	Категорія приміщення за вибухо- і пожежо- не безпекою	Кліматична зона	Ступінь вогнестійкості	Клас приміщення за ймовірністю ураження струмом	Клас приміщення за умовами навколишнього середовища
1	2	3	4	5	6
Бокс для спец автомобіля	В	III	II	з під.неб.	П-1
Ділянка просочування та сушіння	А	III	II	-    -	В-1а
Ділянка фарбування	А	III	II	-    -	В-1а
Ремонтно-монтажна ділянка	В	III	II	-    -	П-Па
Ділянка заготівлі конструкцій	В	III	II	-    -	П-Па
1	2	3	4	5	6
Кабінет майстра	В	III	II	без підв. небезп.	Норм
Гардероб	В	III	II	-    -	норм
Тамбур	В	III	II	-    -	норм
Душова	В	III	II	з під.неб.	сире
Вентиляційна камера	В	III	II	-    -	вологе
Електрощитова	В	III	II	-    -	норм

За технологією виконуваних робіт персонал ремонтної майстерні має справу з дезінфекційними, мийними та антикорозійними засобами, що використовуються при технічному обслуговуванні електрообладнання та вентиляційних систем.

Характеристика окремих виробничих приміщень щодо можливої дії шкідливих та небезпечних факторів на людину наведена у таблиці 7.2.

**Можлива дія шкідливих та небезпечних виробничих факторів на людину у  
виробничих приміщеннях ремонтної майстерні**

Найменування приміщень	Небезпечні та шкідливі виробничі фактори						
	Рухомі машини та механізми	висока загазованість	Високий рівень шуму	Висока вологість повітря	хімічні та токсичні речовини	фізичні перевантаження персоналу	високий рівень напруги в електромережі
Дільниця технічного обслуговування електродвигунів	-	+	-	+	+	+	+
Дільниця ремонту електрообладнання та контролю ізоляції	-	+	-	+	+	+	+
Ремонтно-монтажна дільниця	+	+	+	-	-	+	+
Склад запасних частин і матеріалів	-	-	-	-	-	-	-
Монтажна дільниця електротехнічного обладнання	+	+	+	-	-	+	+

Розробка комплексу заходів щодо усунення небезпечних шкідливих виробничих факторів

Розроблені у проекті організаційні та технічні заходи щодо усунення небезпечних та шкідливих виробничих факторів мають за мету :

- захист від проникнення до обертових частин машин - передбачені огороження;
- запобігання вибуху у разі виникнення небезпечної концентрації пари на ділянках технічного обслуговування, контролю та ремонту електрообладнання - передбачені встановлення вибухо- та вологозахисених світильників згідно з вимогами GMP і монтаж електропроводки в сталевих трубах;
- видалення з приміщень шкідливих газів та забезпечення припливу свіжого повітря - передбачена система вентиляції, яка складається з витяжних та припливних вентиляторів;
- захист від дотику до струмоведучих частин електрообладнання - передбачене захисне заземлення та занулення металевих частин і використання захисних засобів;
- захист споруди від прямих ударів блискавки - передбачений монтаж блискавкоприймальної сітки на даху споруди;
- забезпечення пожежобезпечності - передбачене встановлення пожежних кранів та вогнегасників;
- забезпечення робочих місць місцевим освітленням.

Безпечна робота експлуатаційного персоналу енергетичної служби господарства досягається не тільки організаційними та технічними заходами, але і наявністю високоефективних індивідуальних засобів захисту.

Необхідну кількість захисних засобів, спецодягу, взуття та інших індивідуальних засобів захисту визначаємо, виходячи з чисельності обслуговуючого персоналу, кількості виробничих ділянок і характеру виконуваних робіт [20].

$$Z_{cp} = k_1 \cdot A_{заг} + (k_2 + k_3 \cdot N_{ед}) / d,$$

де  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  - постійні коефіцієнти, які залежать від форми обслуговування електрообладнання та виду захисних засобів;

$A_{заг}$  - обсяг робіт з обслуговування електрообладнання в умовних одиницях;

$N_{ед}$  - кількість установлених електродвигунів;

$d$  - коефіцієнт надійності апарату захисного вимикання (при відсутності даних  $d=0.9$ );

Результати проведених розрахунків представлені в таблиці 7.3.

### Розрахунок необхідної кількості захисних засобів на один рік для ремонтної майстерні

Назва захисних засобів	Марка, тип	ГОСТ, ОСТ або ТУ	Кількість
Показчик напруги	КОНТАК Т-55Є	ТУ У 194634.35.006-95	4
Універсальний пробник-вказівник напруги	УПВН	дослідний зразок	1
Ізолюючі кліщі	К-1000	ТУ 34-13-1632-75	3
Струмовимірювальні кліщі	Ц-4501	ТУ 25-04- 857-76	3
Килимки діелектричні	-	ГОСТ-4997-75	4
Переносні заземлення до 1000В	-	ТУ 34-3820-70	3
Діелектричні калоші	-	ГОСТ-28-10072-80	4
Комплект інструменту з ізольованими рукоятками	КСИ-2	ТУ -28-10072-80	4
Попереджувальні плакати та знаки безпеки для електроустановок	-	ГОСТ 12-4026-76	4

Розрахунок заземлювального пристрою споживчої трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ

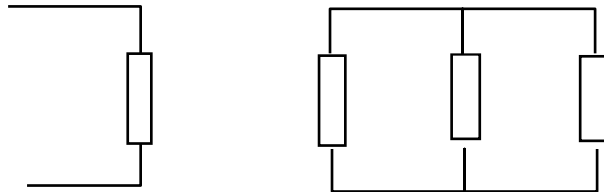
Заземлювальний пристрій виконуємо у вигляді контуру із сталевих штаб з прямокутним поперечним перерізом 40x4 мм з вертикальними електродами діаметром 0,012 м довжиною 5 м, викладеного на глибину  $t=0,8$  м від поверхні землі з двошаровою структурою :  $\rho_1=270$  Ом·м,  $\rho_2=140$  Ом·м,  $h_1=3,5$  м,  $\rho_1/\rho_2=1,33$ . Довжина мережі напругою 10 кВ повітряної лінії  $L_B=35$  км, кабельної  $L_K=11$  км..

В якості природного заземлювача використовується залізобетонний фундамент споруди ( площа якого  $50 \text{ м}^2$  )

1) Висуваємо вимоги мережі 0,38 кВ .

Малюємо схему заміщення :

$$R_{д.} 0,38 \quad R_{п} \quad R_{пов.} R_{шт.} 0,38$$



Для визначення допустимої величини заземлюючого пристрою вирахуємо еквівалентний питомий опір двошарового ґрунту за формулою

$$\rho_{екв} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot k \cdot l}{\rho_1(t + kl - h_1) + \rho_2(h_1 - t)},$$

$$k=1 \text{ при } \rho_1 > \rho_2.$$

$$\rho_{екв} = \frac{270 \cdot 140 \cdot 1 \cdot 5}{270(0,8 + 5 - 3,5) + 140(3,5 - 0,8)} = 189,19 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

Визначаємо опір природного заземлювача:

$$R_{пр} = 0,5 \frac{\rho_{эф}}{\sqrt{S}},$$

де  $\rho_{эф}$  - еквівалентне значення питомого опору ґрунту, Ом $\cdot$ м

$$\rho_{эф} = \rho_1 \left( 1 - e^{-\alpha \frac{h_1}{\sqrt{S}}} \right) + \rho_2 \left( 1 - e^{-\beta \frac{\sqrt{S}}{h_1}} \right),$$

де  $\alpha, \beta$  - коефіцієнти,  $\rho_1 > \rho_2$  -  $\alpha = 3,6, \beta = 0,1$ ;

$$\rho_{эф} = 270 \left( 1 - e^{-3,6 \frac{3,5}{7,07}} \right) + 140 \left( 1 - e^{-0,1 \frac{7,07}{3,5}} \right) = 249,3 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

$$R_{пр} = 0,5 \frac{249,3}{\sqrt{50}} = 17,6 \text{ (Ом)}$$

Для визначення  $R_{п}$  будуємо схему мережі 0,38 кВ.

$$R_{пл} = 10 \frac{189,19}{100} = 18,9 \text{ (Ом)}$$

$$R_{пз} = 30 \cdot 1,89 = 56,7 \text{ (Ом)}$$

Згідно із розрахунками кожен повторний заземлювач повинен мати опір 56,7 Ом, а загальний опір їх на кожній лінії має становити не більше 18,9 Ом.

$$R_{л1} = \frac{R_{пз}}{n_{л1}} = \frac{56,7}{5} = 11,34 \text{ (Ом)} < 18,9 \text{ (Ом)}$$

$$R_{л2} = \frac{R_{пз}}{n_{л2}} = \frac{37,8}{3} = 12,6 \text{ (Ом)} < 18,9 \text{ (Ом)}$$

$$R_{л3} = \frac{R_{пз}}{n_{л3}} = \frac{56,7}{7} = 8,1 \text{ (Ом)} < 18,9 \text{ (Ом)}$$

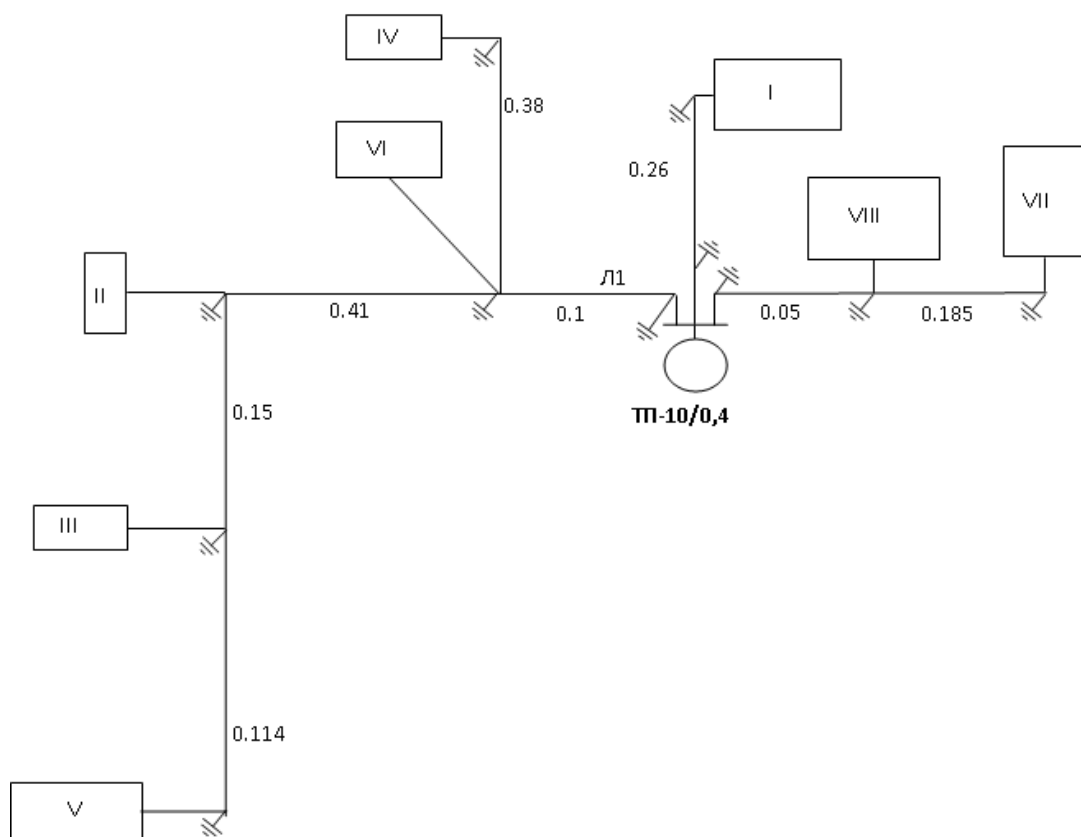


Рис. 7.3 – Розрахункова схема мережі напругою 0,38 кВ

Розташовуємо повторні заземлювачі:

- 1) на кінцях повітряних ліній або відгалужень;
- 2) на вводах у виробничі приміщення;
- 3) за умовами захисту від перенапруг:

Загальний опір повторних заземлювачів на всіх фідерах ПЛ-0,38 кВ:

$$R_{нов} = \frac{R_{л1} R_{л2} R_{л3}}{R_{л1} R_{л2} + R_{л2} R_{л3} + R_{л1} R_{л3}} = \frac{11,34 \cdot 12,6 \cdot 8,1}{11,34 \cdot 12,6 + 12,6 \cdot 8,1 + 11,34 \cdot 8,1} = 3,4 \text{ (Ом)}$$

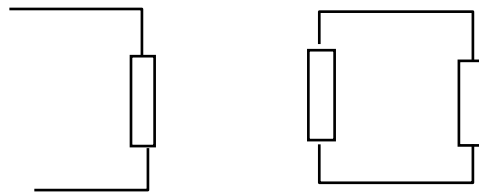
Визначаємо  $R_{екв}$ :

$$R_{екв} = \frac{R_{пр} R_{пов}}{R_{пр} + R_{пов}} = \frac{17,6 \cdot 3,4}{17,6 + 3,4} = 2,85 \text{ (Ом)}$$

Оскільки  $R_{екв}$  менше  $R_{д}$ , то штучного заземлювача можна було б і не виконувати, але правила вимагають обов'язкової наявності  $R_{шт}$ , тому  $R_{шт}$  приймаємо максимально допустиме рівне 56 Ом.

Розрахуємо заземлювач для мережі напругою 10кВ

$R_{д. (10кВ)}$      $R_{пр}$      $R_{шт(10кВ)}$



Визначаємо допустимий опір заземлювача :  $R_{д.} = 125 / I_{кз}$ .

Де  $I_{кз}$ .- струм замикання на землю :

$$I_{кз} = \frac{U(L_n + 35 \cdot L_k)}{\rho_1} = \frac{10(35 + 35 \cdot 11)}{270} = 15,5 \text{ (А)}$$

$$R_{д.} = 125 / 15,5 = 8,06 \text{ Ом} < 10 \text{ Ом.}$$

Опір штучного заземлення визначаємо за формулою :

$$R_{шт} = \frac{R_{д.} \cdot R_{пр}}{R_{пр} - R_{д.}} = \frac{8,06 \cdot 17,6}{17,6 - 8,06} = 14,87 \text{ (Ом)}$$

Порівнявши  $R_{шт}(0,4)$  і  $R_{шт}(10)$  для розрахунку приймаємо менше з них :

$$R_{шт}(10) = 14,87 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір розтікання струму одного стержня :

$$R_{в} = \frac{\rho_{екв} \cdot k_c}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+1}{4h-1} \right),$$

$k_c$ - коефіцієнт сезонності,  $K_c = 1,5$

h- відстань від поверхні землі до середини стержня

$$h=t+0,5L=0,8+0,5\cdot 5=3,3 \text{ м.}$$

$$R_B = \frac{189,19 \cdot 1,5}{6,28 \cdot 5} \left( \ln \frac{10}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 64,3 \text{ (Ом)}$$

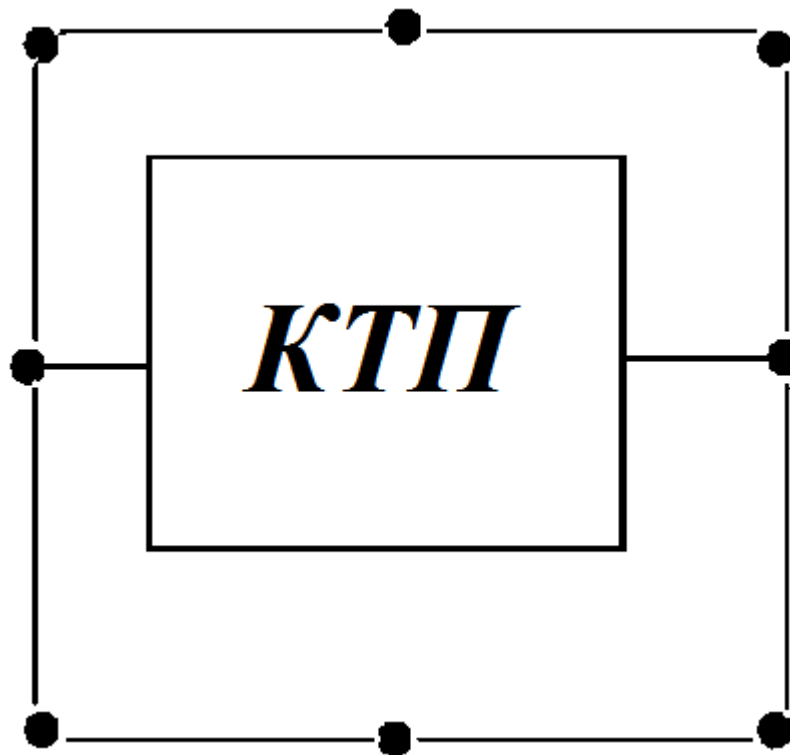
$$q_B = \frac{1}{R_B} = 0,0156 \text{ (См)}$$

Кількість вертикальних стержнів визначаємо за формулою :

$$n = \frac{R_B}{R_{шт}} = \frac{64,3}{14,87} = 4,3$$

Приймаємо 8

Схема заземлювального контуру



Визначаємо опір розтікання струму горизонтальної полоси:

$$R_{\Gamma} = \frac{k_c \cdot \rho_{\text{екв.}\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\Gamma}} \cdot \ln \frac{2 \cdot L_{\Gamma}^2}{b \cdot t},$$

де : b- ширина горизонтальної полоси = 0,04 м

$\rho_{\text{екв.г.}}$ - еквівалентний питомий опір для горизонтального заземлювача , його розраховують шляхом інтерполяції

$L_{\Gamma}$ - довжина одного горизонтального заземлювача =5 м.

Розрахунок  $\rho_{\text{екв.г.}}$  ведемо використовуючи дані з таблиці «Відносні значення еквівалентного питомого опору  $\rho_{\text{ст}}/\rho_{\Gamma}$ . двошарової землі для розрахунку опору простого горизонтального заземлювача.

$$\frac{\rho_{\text{екв.г.}}}{\rho_2} = 1,73 \quad \rho_{\text{екв.г.}} = 1,73 \cdot 140 = 242,2 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}$$

$$R_{\Gamma} = \frac{1,5 \cdot 242,2}{6,28 \cdot 5} \ln \frac{2 \cdot 25}{0,04 \cdot 0,8} = 85,09 \text{ (Ом)}$$

$$q_{\Gamma} = \frac{1}{R_{\Gamma}} = 0,012 \text{ (См)}$$

$$\text{Опір штучного заземлювача : } R_{\text{шт}} = \frac{1}{\eta \cdot (n \cdot q_B + q_{\Gamma})},$$

де  $\eta$  - коефіцієнт використання складного заземлювача , його вибираємо з однойменної таблиці.

$$\frac{h}{l_{\Gamma}} = \frac{3,5}{5} = 0,7 \quad \frac{a}{l_{\Gamma}} = \frac{2,5}{5} = 0,5$$

Для визначення  $\eta$  також застосовується метод інтерполяції

$$R_{\text{шт}} = \frac{1}{0,411(8 \cdot 0,0156 + 0,012)} = 17,8 \text{ (Ом)} < 14,87 \text{ (Ом)} - \text{ умова не виконується.}$$

Збільшуємо кількість вертикальних стержнів на 4 шт.

$$R_{\text{шт}} = \frac{1}{0,411(12 \cdot 0,0156 + 0,012)} = 12,19 \text{ (Ом)} < 14,87 \text{ (Ом)} - \text{ умова виконується.}$$

Отже необхідно взяти 12 вертикальних стержнів.

### Блискавкозахист ремонтної майстерні

Приміщення ремонтної майстерні за класифікацією [1] відносяться до класу П-Па та згідно з чинними нормативними матеріалами<sup>1</sup> підлягають блискавкозахисту за III-ю категорією. Як будівля, ремонтна дільниця

електрообладнання ТОВ «Біофарма Плазма» відноситься до II-го ступеню вогнестійкості.

Захист від прямих ударів блискавки виконується блискавкоприймальною сіткою, розміщеною на даху будівлі. Такий тип блискавкозахисту застосовується для будівель з плоским дахом, довжина яких не перевищує 25м. Конструктивне виконання блискавкозахисту (рис 7.4) передбачає площу чарунок сітки не більше 150 м<sup>2</sup>. Блискавкоприймальна сітка виконана із сталюго дроту діаметром 6 мм. Сітка сполучується струмовідводами із заземлювачами, виконаними з круглої сталі діаметром 10 мм та з'єднаними сталюю штабою розмірами 4х40мм

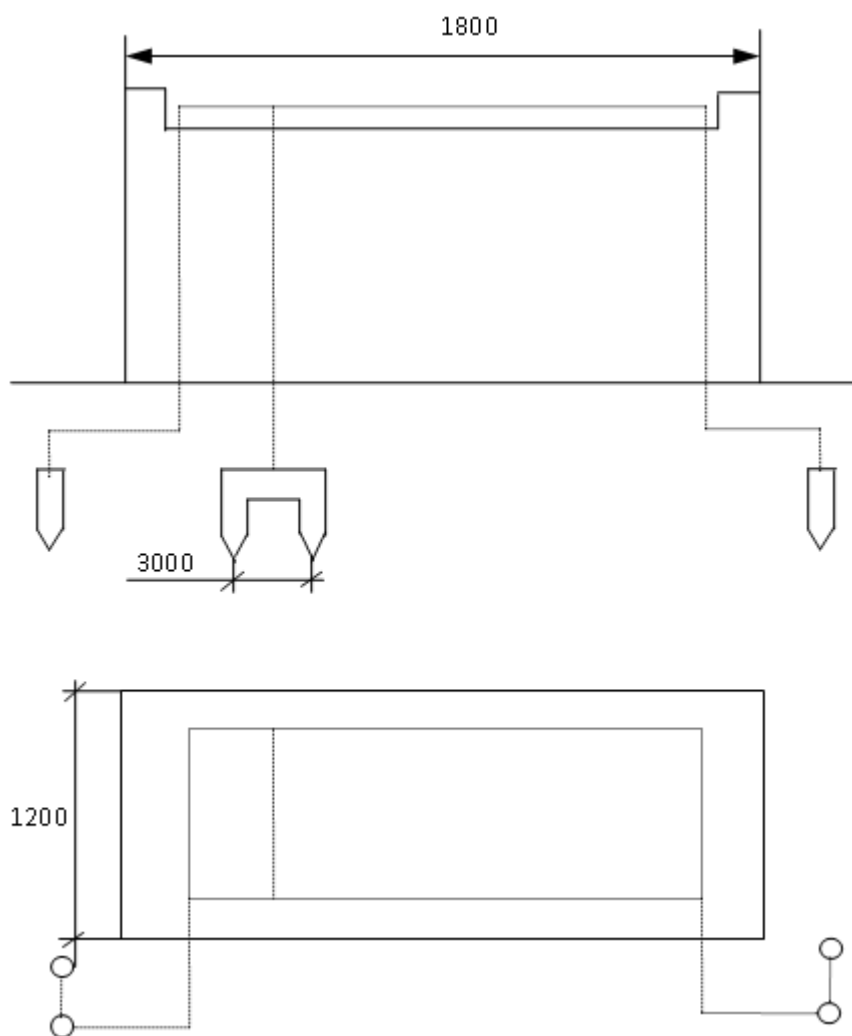


Рис. Конструктивне виконання блискавко захисту

Пожежна безпека

Виробничі приміщення ремонтної майстерні за вибухо- та

пожежонебезпекою відносяться до класу П-Па (за винятком двох діляниць класу П-Ia), проводимо його аналіз з точки зору пожежобезпеки. Причиною спалаху може стати поява відкритого вогню у разі підвищення концентрації парів дезінфекційних або спиртовмісних речовин у приміщеннях технічного обслуговування, парів бензину та розчинників. Заходи по забезпеченню пожежної безпеки передбачають на ділянках фарбування, просочування та сушіння 4 пожежних крана та пожежну сигналізацію. Необхідна витрата води для потреб внутрішнього пожежегасіння - 5 л/с. Розрахункова втрата води на внутрішнє пожежегасіння виконується від водопровідної мережі.

Пожежна сигналізація забезпечена приладом "Сигнал-31" (СТУ 25.15.555-73) з повідомлювачами типу ДТЛ чи ЛПС-038.

### Кількість пожежного інвентарю

Найменування пристроїв та засобів захисту	Тип	Місце становлення	Кількість
Вогнегасник	ОХП-10 ОУ-5	Ділянки ремонту й обслуговування електрообладнання	2
Ящик з піском		Ділянка заготівлі конструкцій	1
Пожежний щит:			1
відро			2
лопата			1
сокира		Біля контрольного входу	1
багор			1
вогнегасник	ОХП-10		1

## ВИСНОВОК

У даній магістерській роботі здійснено комплексне дослідження процесів ремонту асинхронних електродвигунів і розроблено технологію, яка передбачає впровадження компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності та надійності роботи електричних машин після відновлення.

У ході виконання роботи проведено аналіз технічного стану асинхронних двигунів, виявлено найпоширеніші несправності, що виникають у процесі експлуатації, а також визначено основні етапи технологічного циклу ремонту. Було розроблено детальну послідовність ремонтних операцій, яка включає: діагностику електричних параметрів, перевірку ізоляції обмоток, ремонт або перемотування статорів і роторів, відновлення механічних з'єднань, балансування ротора та контроль якості після завершення робіт.

Особливу увагу в магістерській роботі приділено питанню компенсації реактивної потужності — одній із ключових складових підвищення енергоефективності електромеханічних систем. Проведено теоретичне та практичне обґрунтування використання ємнісних пристроїв для внутрішньої компенсації реактивної потужності безпосередньо у схемі підключення двигуна. Це дозволяє зменшити навантаження на мережу, скоротити струми у проводах, знизити втрати активної потужності та покращити загальний коефіцієнт потужності.

Отримані результати експериментальних та розрахункових досліджень свідчать, що при застосуванні внутрішньої ємнісної компенсації струм холостого ходу асинхронного двигуна зменшується на **30–40%**, а при роботі під номінальним навантаженням — споживаний струм зменшується на **12–15%**. У той же час коефіцієнт потужності підвищується на **10–15%**, а коефіцієнт корисної дії збільшується на **2–3%** у стандартних режимах роботи та на **5–6%** при часткових навантаженнях. Завдяки цьому загальні транспортні втрати активної енергії в електричній системі можуть бути зменшені на **до 40%**, що є суттєвим економічним ефектом.

Запропонована технологія дозволяє не лише підвищити енергетичну ефективність роботи двигунів після ремонту, а й оптимізувати експлуатаційні витрати ремонтних підприємств. Вона забезпечує:

- **зниження плати за спожиту електричну енергію** на виробничі потреби;
- **зменшення плати за перетоки реактивної енергії** між споживачем і енергопостачальною організацією;
- **покращення стабільності роботи електричних мереж** завдяки зниженню реактивного навантаження;
- **підвищення надійності електрообладнання** та продовження його експлуатаційного ресурсу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергозбереження» № 74/94-ВР від 01.07.1994 р.
2. Закон України «Про ринок електричної енергії» № 2019-VIII від 13.04.2017 р.
3. Закон України «Про охорону праці» № 2694-XII від 14.10.1992 р.
4. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — К.: Мінпаливенерго України, 2017.
5. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). — К.: Мінпаливенерго України, 2020.
6. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — К.: Держнаглядохоронпраці, 2020.
7. ДСТУ ІЕС 60034-1:2015. Машини електричні обертові. Частина 1: Номінальні дані та характеристики.
8. ДСТУ EN 60204-1:2016. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги.
9. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування.
10. ІЕС 60947-4-1:2019. Low-voltage switchgear and controlgear — Contactors and motor-starters.
11. ГОСТ 28249-93. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1 кВ.
12. Настанова GMP (Наказ МОЗ України № 1130 від 16.06.2021 р.) — Вимоги до фармацевтичних виробництв.
13. Рекомендації з енергоефективності промислових підприємств. — К.: Держенергоефективності України, 2022.
14. Гайдук В. С. Сучасні методи енергозбереження в промисловості. — К.: Техніка, 2019. — 312 с.
15. Лисенко В. П. Промислові електроустановки та системи керування. — К.: НТУУ «КПІ», 2021. — 284 с.
16. Лавріненко А. І. Електропривод: теорія, елементи, системи керування. — К.: Вища школа, 2018. — 420 с.
17. Костюк О. В. Підвищення енергоефективності асинхронних електродвигунів промислових підприємств // Енергетика та електротехніка. — 2022. — № 3. — С. 44–51.
18. Гришин І. М. Компенсація реактивної потужності на промислових об'єктах // Вісник КПІ. Серія «Енергетика». — 2021. — № 4. — С. 22–28.
19. Довідник з електротехніки / За ред. Бондаренка П. П. — К.: Освіта, 2016. — 512 с.

20. Біофарма Плазма [Електронний ресурс]. — Режим доступу:  
<https://biopharma.com.ua>
21. Офіційний сайт Держенергоефективності України [Електронний ресурс]. —  
Режим доступу: <https://saee.gov.ua>
22. Гусев І. П., Ігнатенко В. В. Енергозбереження в електричних системах підприємств. — Харків: УкрДАЗТ, 2020. — 280 с.
23. Трифонов О. І., Рибалко О. М. Технології ремонту асинхронних електродвигунів. — К.: Енергія, 2018. — 190 с.
24. Савенко І. П. Методи підвищення коефіцієнта потужності електроустановок. — Львів: ЛНТУ, 2022. — 164 с.
25. Черняк В. Г., Бабич В. П. Основи охорони праці: Навч. посібник. — К.: КНЕУ, 2018. — 308 с.
26. Довідник електрика. — К.: Основа, 2021. — 480 с.
27. Сучасні технології ремонту електродвигунів і компенсації реактивної потужності / Під ред. А. П. Величка. — Харків: Енергія, 2023. — 242 с.

## ДОДАТКИ

### Додаток А.1

Картка обліку використання стандартів у магістерській роботі:  
 ”Розроблення технології для проведення ремонтів асинхронних двигунів із  
 використанням компенсації реактивної потужності.”.  
 (виконав – студент Лук`янець І.Р., керівник – доц. Чуєнко Р.М.)

Етапи застосування стандартів при виконанні магістерської роботи	ДСТУ, ГОСТ, гармонізовані стандарти, стандарти ІЕС, ISO		
	назва ДСТУ	назва міжнародного стандарту(ISO, EN, ІЕС тощо)	джерело посилання
Технологічна частина розробки та модернізації асинхронних двигунів	ОСТ 12.0.003-74 (СТ РЕВ 790-77). Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація ГОСТ 4997-75 Килими діелектричні гумові. Технічні умови ГОСТ 12,4,026-76 з змін. Кольори сигнальні та знаки безпеки ТУ 34-13-1632-75 Кліщі електровимірювальні. На напругу 10 кВ з межею ОСТ 12.1.004-91 Пожежна безпека. Загальні вимоги * ДСТУ ГОСТ 2.601:2006 Єдина система конструкторської документації. Експлуатаційні документи. * ДСТУ ГОСТ 2.610:2006 Єдина система конструкторської документації. Правила виконання експлуатаційних документів. ДЕРЖСТАНДАРТ 2.602-95 Ремонтні документи.		<a href="http://www.normativ.ua">www.normativ.ua</a> <a href="http://www.document.ua">www.document.ua</a> <a href="http://www.ielectro.ua">www.ielectro.ua</a> <a href="http://standarts.net/ds">http://standarts.net/ds</a> ty
Електротехнічна частина та елементи компенсації реактивної потужності	ГОСТ 9098-78 МІЖДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ. Вимикачі автоматичні низьковольтні. Загальні технічні умови ГОСТ 3699-82 МІЖДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ. Реле напруги захисту низьковольтні. Загальні технічні вимоги ГОСТ 16308-84 Реле електротеплові струмові. Загальні технічні умови ГОСТ 27888-88 (МЕК 34-11-1-78) Машини електричні обертові. Вбудований температурний захист. Правила захисту. ГОСТ 14254-96 (МЕК 529-89) Ступені захисту, що забезпечуються оболонками (Код ІР). ГОСТ 15543-70 Вироби електротехнічні. Виконання для різноманітних кліматичних районів. Загальні технічні вимоги щодо впливу кліматичних факторів		-//-

	<p>зовнішнього середовища. ГОСТ 183-74 Машини електричні, що обертаються. Загальні технічні вимоги. ГОСТ 6825-91 (МЭК 81-84) Лампы люминесцентные трубчатые для общего освітлення. ГОСТ 2.701-84. Правила виконання схем ГОСТ 16442-80. Кабелі силові із пластмасовою ізоляцією. Технічні умови ГОСТ 19523-7 Двигуни трифазні асинхронні короткозамкнуті серії 4А потужністю від 0,06 до 400 кВт. Загальні технічні умови ГОСТ 433-73 Кабелі силові з гумовою ізоляцією. Технічні умови</p>		
Розроблення пристроїв компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів	<p>ГОСТ 15963-79 Електротехнічні вироби для районів з тропічним кліматом. Загальні технічні вимоги та методи випробувань ГОСТ 16962-71 Вироби електронної техніки та електротехніки. Механічні та кліматичні впливи. Вимоги та методи випробувань ГОСТ 24606.3-82 (СТ РЕВ 3985-83) Вироби комутаційні, настановні та електричні з'єднувачі. Методи вимірювання опору контакту та динамічної та статичної нестабільності перехідного опору контакту ДЕРЖСТАНДАРТ 24813-81 Випробування виробів на вплив кліматичних факторів. Загальні положення &lt;br&gt;2823-94 Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення</p>		-//-
Охорона праці	<p>ГОСТ 12.1.009-76 ССБТ Електробезпека. Терміни та визначення ССБП ДСТУ 2293-93 Система стандартів безпеки праці. Терміни та визначення * ДСТУ 2272-93 Пожежна безпека. Терміни та визначення ДБН А 3.1-3-94. Прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів ТУ 34-09-10130-82 Вказівник низької напруги типу УНН-10. Технічні умови ТУ34-13-16-32-75 Ізолюючі кліщі на 6-35 кВ. Технічні умови  ТУ38-106359-79 Рукавички діелектричні зі швом. Технічні</p>		-//-

	<p>умови ГОСТ 13385-78. Боти діелектричні. Технічні умови ГОСТ 4997-75. Килими діелектричні гумові. Технічні умови ГОСТ 124013-75. Окуляри захисні. Технічні умови ГОСТ 8711-93. Кліщі струмомірні. Технічні умови ГОСТ 12.4.121-83. Система стандартів безпеки праці. Протигази промислові фільтруючі. Технічні умови</p>		
<p>Вимоги до експлуатації електрообладнання на фармацевтичних підприємствах</p>	<p>ДСТУ EN ISO 9001:2018 — Системи управління якістю. ДСТУ EN ISO 14644-1:2021 — Чисті приміщення та контроль чистоти повітря. ДСТУ ІЕС 60204-1:2015 — Безпечність машин. Електрообладнання машин.</p>		<p><a href="http://www.iso.org">www.iso.org</a> <a href="http://www.standart.ua">www.standart.ua</a></p>