

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет ) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого  
Кафедра Електропостачання і енергоменеджменту**

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту (декан факультету)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сергій БЛАЖЕНКО  
(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сергій БАЛЮТА  
(ім'я та прізвище)

«\_\_» лютого 2024 р.

«\_\_» лютого 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»  
на тему: «Розробка СЕП електромеханічного заводу м. Мукачєво та імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла»

Виконав: здобувач 5 курсу, групи ЕЛ 2-7М

Йовбак Василь Васильович  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник Балюта Сергій Миколайович  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент Василь ЛИЗАНЕЦЬ  
(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Я, як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого  
Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту  
Освітній ступінь магістр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕПЕМ  
/Сергій БАЛЮТА/  
« 20 » листопада 2023 р.

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Йовбака Василя Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка СЕП електромеханічного заводу м. Мукачєво та імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла

керівник роботи Балюта Сергій Миколайович, д.т.н., проф.  
затверджені наказом закладу вищої освіти від « 20 » листопада 2023 р. № 940-кс.

2. Строк подання здобувачем роботи 09 лютого 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи Генеральний план заводу електромеханічного заводу м. Мукачєво з зазначенням місця розташування основних цехів; встановлена потужність цехів заводу; план розташування електрообладнання інструментального цеху та його характеристики; відомості про джерела живлення заводу; умови проектування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Коротка характеристика технологічного процесу; розрахунок високовольтних та низьковольтних електричних навантажень заводу; вибір числа й потужності трансформаторів на ГПП та цехових трансформаторних підстанцій; вибір оптимальної системи напруги живлення заводу; вибір схеми й напруги внутрішньої заводської мережі; розрахунок струмів короткого замикання на стороні високої та низької напруги; вибір і перевірка апаратів у мережі напругою вище 1000 В; розрахунок мережі низької напруги інструментального цеху; релейний захист і автоматика; спецпитання: імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла

5. Перелік графічного матеріалу

1. Генплан заводу з картограмою навантаження та розподільчою мережею. 2. Схема електрична принципова внутрішньозаводської електричної мережі. 3. План розташування електрообладнання і силової мережі інструментального цеху. 4. Схема електрична принципова електропостачання інструментального цеху. 5. Схема захистів трансформатора і відходящих ліній ГПП. Схема АВР секційного вимикача. 6. Імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла в середовищі Matlab.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20 листопада 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Пор №	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу	20.11.2023 р	
2	Вступ	23.11.2023 р	
3	Коротка характеристика технологічного процесу	26.11.2023 р	
4	Розрахунок електричних навантажень заводу	04.12.2023 р	
5	Вибір числа та потужності трансформаторів на ГПП	08.12.2023 р	
6	Вибір оптимальної системи напруги на підприємстві	12.12.2023 р	
7	Вибір числа та потужності цехових трансформаторних підстанцій	15.12.2023 р	
8	Вибір схеми й напруги внутрізаводської мережі	18.12.2023 р	
9	Розрахунок струмів короткого замикання в мережі напругою понад 1 кВ	23.12.2023 р	
10	Вибір та перевірка апаратів у мережі напругою понад 1 кВ	28.12.2023 р	
11	Розрахунок мережі низької напруги інструментального цеху	08.01.2024 р	
12	Релейний захист і автоматика	18.01.2024 р	
13	Спецпитання. Імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла	25.01.2024 р	
14	Список літератури	27.01.2024 р	
15	Формулювання рекомендацій та висновків	29.01.2024 р	
16	Оформлення пояснювальної записки	31.01.2024 р	
17	Оформлення графічної частини роботи	05.02.2024 р	
18	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	09.02.2024 р	

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Василь ЙОВБАК**  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Сергій БАЛЮТА**  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Йовбак В.В. Розробка СЕП електромеханічного заводу м. Мукачево та імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний Університет Харчових Технологій

Київ -2024

Кваліфікаційна робота: 152 с.; 36 рис.; 22 табл.; 16 джерел.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка ефективної системи електропостачання електромеханічного заводу м. Мукачево та дослідження частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab.

До пояснювальної записки надано графічну частину, яка складається із шести креслень: генплан заводу з картограмою навантаження та розподільчою мережею; схема електрична принципова внутрішньозаводської електричної мережі; план розташування електрообладнання і силової мережі інструментального цеху; схема електрична принципова електропостачання інструментального цеху; схема захистів трансформатора і відходящих ліній ГПП, схема АВР секційного вимикача; імітаційне моделювання частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла в середовищі Matlab.

У результаті виконання роботи наведено коротку характеристику технологічного процесу; виконано розрахунок електричних навантажень; визначено число й потужність силових трансформаторів на ГПП та цехових трансформаторних підстанцій; розраховано та вибрано високовольтне і низьковольтне електрообладнання та провідники і перевірено їх до дії струмів короткого замикання; розглянуто питання релейного захисту і автоматики та досліджено частотно-регульований електропривод насоса водогрійного котла за допомогою імітаційного моделювання з використанням пакету Matlab.

**Ключові слова:** електромеханічний завод, електричне навантаження, трансформатор, високовольтний вимикач, апарат захисту, запобіжник, кабель, провід, релейний захист, електропривод, насос, водогрійний котел.

## ANNOTATION

Yovbak V.V. Development of the SEP of the Mukachevo electromechanical plant and simulation modeling of the frequency-regulated electric drive of the water heating boiler pump.

141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

National University of Food Technologies

Kyiv - 2024

Qualification work: 152 p.; 36 Fig.; 22 tables; 15 sources.

The purpose of the qualification work is the development of an efficient power supply system of the electromechanical plant in Mukachevo and the study of the frequency-regulated electric drive of the water heating boiler pump using simulation modeling in the Matlab environment.

The explanatory note is accompanied by a graphic part consisting of six drawings: a general plan of the plant with a load map and a distribution network; electrical circuit diagram of the internal factory electrical network; location plan of electrical equipment and power network of the tool shop; electrical scheme of the basic power supply of the tool shop; protection scheme of the transformer and outgoing lines of the GPP, AVR scheme of the sectional switch; simulation modeling of the frequency-regulated electric drive of the water heating boiler pump in the Matlab environment.

As a result of the work, a brief description of the technological process is given; the calculation of electrical loads has been performed; the number and power of power transformers at the GPP and workshop transformer substations are determined; calculated and selected high-voltage and low-voltage electrical equipment and conductors and tested them for short-circuit currents; the issue of relay protection and automation was considered, and the frequency-regulated electric drive of the water heating boiler pump was investigated with the help of simulation modeling using the Matlab package.

**Keywords:** electromechanical plant, electrical load, transformer, high-voltage switch, protection device, fuse, cable, wire, relay protection, electric drive, pump, water boiler.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.	11
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАВОДУ.....	13
2.1. Розрахунок електричних навантажень, побудова картограми навантаження та визначення центру електричних навантажень.....	13
2.2. Картограма навантаження й визначення центру електричних навантажень.....	18
3. ВИБІР ЧИСЛА ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ГПП.	22
4. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГИ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	23
4.1. Вибір оптимальної напруги живлення підприємства.....	23
4.2. Вибір схеми зовнішнього електропостачання підприємства.....	26
5. ВИБІР ЧИСЛА ТА ПОТУЖНОСТІ ЦЕХОВИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ.....	29
5.1. Вибір числа та потужності цехових трансформаторів.....	29
5.2. Баланс реактивної потужності.....	30
5.3. Визначення числа силових трансформаторів для цехових ТП.....	34
6. ВИБІР СХЕМИ Й НАПРУГИ ВНУТРІЗАВОДСЬКОЇ МЕРЕЖІ.....	36
7. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ПОНАД 1 КВ.....	40
8. ВИБІР ТА ПЕРЕВІРКА АПАРАТІВ У МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ПОНАД 1 КВ.....	46
8.1. Вибір апаратів ВРП 35 кВ.....	46
8.2. Вибір апаратів ЗРП 10 кВ та ЦРП.....	48
8.3. Вибір та перевірка шинопроводів.....	49
8.4. Вибір та перевірка ізоляторів.....	52

8.5.	Вибір та перевірка трансформаторів струму.....	53
8.6.	Вибір та перевірка трансформаторів напруги.....	57
8.7.	Вибір та перевірка вимикачів навантаження.....	59
9.	Розрахунок мережі низької напруги інструментального цеху.....	61
9.1.	Визначення розрахункового електричного навантаження цеху.....	64
9.2.	Розподіл електроприймачів цеху по пунктах живлення.....	68
9.3.	Вибір силової розподільчої мережі та апаратів керування й захисту.....	80
9.4.	Розрахунок струмів короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ	86
9.5.	Побудова карти селективного захисту.....	90
9.6.	Розрахунок струмів при однофазних замиканнях на землю.....	94
9.7.	Розрахунок відхилення напруги.....	97
10.	Релейний захист і автоматика.....	100
10.1	Захист ліній на ділянці від ГПП до ЦРП та до цехових підстанцій.....	101
10.2.	Захист понижувальних трансформаторів.....	108
10.3.	Автоматика.....	123
10.4.	Структурна схема захисту трансформатора ТДН-16000/35/10.....	125
11.	СПЕЦПИТАННЯ. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСА ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА.....	126
	ВИСНОВКИ.....	148
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	151

## ВСТУП

Системи електропостачання промислових підприємств створюються для забезпечення живлення електроенергією промислових приймачів, до яких відносяться електродвигуни різних машин і механізмів, електричні печі, електролізні установки, апарати й машини для електричного зварювання, освітлювальні установки тощо.

У міру розвитку електроспоживання ускладнюються й системи електропостачання промислових підприємств. Виникає необхідність впроваджувати автоматизацію систем електропостачання промислових підприємств, здійснювати в широких масштабах диспетчеризацію процесів виробництва із застосуванням телесигналізації й телекерування й вести активну роботу з економії електроенергії.

Важливою особливістю систем електропостачання є неможливість створення запасів електроенергії.

Вся одержувана електроенергія негайно споживається. При непередбачених коливаннях навантаження необхідна точна й негайна реакція системи керування, щоб компенсувати виниклий дефіцит.

Головною проблемою в найближчому майбутньому з'явиться створення раціональних систем електропостачання промислових підприємств, що зв'язано з наступним:

1) вибором і застосуванням раціонального числа трансформацій. Застосування на промислових підприємствах раціональних систем електропостачання приведе до скорочення числа трансформацій до двох-трьох. У цьому випадку економія електроенергії складе не менш 10-15% усього її витрати (споживання) промисловим підприємством;

2) вибором і застосуванням раціональних напруг. Застосування раціональних напруг у системах електропостачання промислових підприємств дає значну економію у втратах електроенергії. Нераціональні рішення в цьому напрямку приводять до того, що в експлуатації перебувають системи електропостачання, у яких втрати електроенергії доходять до 35-40%;

3) правильним вибором місця розміщення цехових і головних розподільних (знижувальних) підстанцій. Розташування живильних підстанцій у відповідних центрах електричних навантажень забезпечує мінімальні річні наведені витрати. Усякий зсув живильної підстанції із центра електричних навантажень веде до збільшення цих витрат і підвищеній витраті електроенергії;

4) подальшим удосконалюванням методики визначення електричних навантажень. Правильне визначення очікуваних навантажень сприяє рішенню загального завдання оптимізації побудови систем внутрішньозаводського електропостачання;

5) раціональним вибором числа й потужності трансформаторів, а також схем електропостачання і їхніх параметрів, що веде до скорочення втрат електроенергії, підвищенню надійності й сприяє здійсненню загального завдання оптимізації побудови систем електропостачання;

6) принципово новою постановкою для рішення таких завдань, як, наприклад, вирівнювання електричних навантажень.

Підтримка напруги, близької до номінальної, звичайно провадиться за рахунок регулювання напруги різними додатковими пристроями. При цьому особливо в умовах глибокого регулювання напруги мають місце додаткові втрати електроенергії. У таких випадках ефективніше застосовувати підвищення номінальної напруги, що набагато вигідніше економічно.

Загальне завдання оптимізації систем промислового електропостачання крім зазначених вище положень включає також раціональні рішення на вибір перетинів проводів і жили кабелів, способів компенсації реактивної потужності, автоматизації, диспетчеризації тощо.

Вимоги, ставляться до схем електропостачання, залежать від багатьох факторів, сутність основних з них зводиться до наступного:

1. Джерела живлення необхідно максимально наближати до електроустановок споживачів.

2. Система електропостачання повинна забезпечувати необхідну надійність живлення підприємства й окремих споживачів відповідно до їхньої категорії за ступенем відповідальності.

3. Схеми електропостачання, як правило, повинні будуватися таким чином, щоб усі їхні елементи постійно знаходилися під напругою.

4. Робота всіх елементів схеми (ліній, трансформаторів) повинна передбачатися, як правило, роздільна, тому що при паралельній роботі збільшуються струми короткого замикання й ускладнюються пристрої релейного захисту.

5. При побудові схем електропостачання необхідно застосовувати глибоке секціонування шин у всіх ланках системи розподілу енергії, починаючи від вузлової підстанції і закінчуючи шинами підстанцій нижчої напруги.

6. Повинні передбачатися заходи щодо забезпечення необхідних показників якості електроенергії (зокрема стабільність, мінімум коливань і припустимі величини відхилень напруги в нормальних, аварійних і післяаварійних режимах).

7. Система електропостачання як у схемній, так і в конструктивній частині повинна передбачати і забезпечувати можливість зростання електричних навантажень на найближчі 10 років.

8. Система електропостачання підприємства повинна задовольняти економічності, що відповідає мінімуму розрахункових витрат, простоті, зручності і безпеці експлуатації.

Такі найголовніші вимоги до систем електропостачання на всіх її ступенях.

## 1. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Основні проблеми машинобудівного комплексу України пов'язані із необхідністю розвитку економічних зв'язків у постачанні комплектуючих, втратою традиційних ринків збуту продукції, орієнтацією підприємств на випуск продукції військового призначення, а також технічною відсталістю і низькою, порівняно з міжнародними стандартами, якістю виробів.

Дане підприємство належить до електротехнічного машинобудування машинобудівного комплексу України, яке спеціалізується на випуску електричних двигунів, апаратів, приладів, кабелю та іншої продукції, що призначена для передачі і споживання електроенергії.

Лиття каркасів виконується на окремому майданчику в ливарному цеху. Його електропостачання здійснюється кабельними лініями окремо від електропостачання підприємства.

У заготівельному цеху зі сталеві стрічки нарізають сталеві листи різної товщини і форми (за призначенням). Далі листи очищаються від бруду і плівки антикорозійного мастила.

У штамповому цеху з підготовлених листів вирізають пластини для складання роторів, статорів і якорів. Далі виконується відпал, очищення, покриття ізоляційним лаком і збірка статорів, якорів і роторів. В інструментальному цеху виготовляють вали та обробляють різні вироби, які використовуються у виробництві електродвигунів. На обмотувальних ділянках виготовляють обмотки з мідного й алюмінієвого намотувального матеріалу. На монтажних ділянках проводять просочення ізоляційним лаком, термічну обробку та складання виробів.

На території підприємства розміщені адміністративні й допоміжні приміщення, інструментальний корпус і корпус для виробництва електродвигунів спецпризначення.

Основна частка електричної енергії споживається електроприймачами, що зосереджені в інструментальному, механоскладальному, штампувальному і обдирочному корпусах.

Всі споживачі електричної енергії підприємства відносяться за надійністю електропостачання до II і III категорії, оскільки в нашому випадку відсутнє устаткування, що бере участь у безперервному циклі. Відключення електроенергії допускається під час ремонту або заміни силових трансформаторів, вимикачів чи кабельних ліній або при включенні резерву. При цьому перебої в електропостачанні не вплинуть на якість виробленої продукції, але при цьому загальний час відключень за місяць не має перевищувати шести годин, щоб відключення не сильно вплинули на загальний обсяг виробленої продукції за місяць.

Електропостачання електромеханічного заводу характеризується рівним графіком навантаження, тобто нормальним режимом з невеликими добовими коливаннями навантаження.

Основним завданням магістерської роботи є розробка ефективної системи електропостачання електромеханічного заводу м. Мукачево та дослідження частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab.

## **2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАВОДУ**

### **2.1. Розрахунок електричних навантажень, побудова картограми навантаження та визначення центру електричних навантажень**

При проектуванні систем електропостачання виконується ряд розрахунків, результати яких дозволяють вибрати устаткування підстанцій, перерізи і матеріал провідників, найекономічніші способи передачі електричної енергії, конфігурацію мережі, розташування трансформаторних підстанцій тощо. Визначення розрахункових електричних навантажень та облік зміни їх в часі в цьому випадку є вихідним матеріалом для всього подальшого проектування.

Метою розрахунку є прогнозування графіка і визначення величини розрахункового навантаження за допомогою теоретичних методів на підставі даних досвіду по аналогічних підприємствах, а також на основі вивчення технології виробництва з погляду електричних навантажень. При цьому правильне визначення очікуваних електричних навантажень грає виключно важливу роль при рішенні вказаних вище питань. Неправильне визначення навантажень може звести до нуля ефект зусиль, що спрямовані на створення раціональної системи електропостачання.

При визначенні очікуваних електричних навантажень стикаються з певними труднощами, витікаючими з їх характеру вірогідності та необхідності прогнозу на розрахунковий період. Це вимагає значних обсягів дослідження і вивчення численної статистики, єдиної методики її обробки, а також встановлення економічно виправданого розрахункового рівня навантажень.

Залежно від цілей та стадій проектування, методів розрахунку мереж і наявної інформації про споживачів, величини розрахункових навантажень і способи їх нормування можуть значно змінюватися. Останнє можна пояснити тим, що основні споживачі електричної енергії більшості підприємств працюють, як правило, в режимі, відмінному від тривалого, що приводить до частої зміни, і в широких межах їх навантаження протягом робочих періодів. Якщо ще врахувати, що двигуни окремих машин і механізмів вибирають іноді значно завищеної потужності, а робочі періоди (максимуми і мінімуми) навантажень

окремих споживачів не зв'язані жорстко між собою в часі, то складність визначення очікуваних навантажень буде особлива чуттєва.

Ці обставини в значній мірі визначили відсутність в промисловості до теперішнього часу єдиного підходу до питання визначення очікуваних електричних навантажень і створення науково обгрунтованого методу їх розрахунку.

Існує багато сучасних методів та методик визначення розрахункових навантажень. У даній роботі для розрахунку на стадії проектування, коли відсутні такі дані, як кількість і потужність електроприймачів, споживання електроенергії на одиницю продукції, щільність навантаження на квадратний метр площі, розрахункове навантаження визначаємо за методом коефіцієнту попиту.

Розрахункова повна потужність підприємства визначається по розрахункових активних і реактивних навантаженнях цехів (до й вище 1000 В) з урахуванням розрахункового навантаження освітлення цехів і території підприємства, втрат потужності в трансформаторах цехових підстанцій і ГПП та втрат у високовольтних лініях.

Розрахункове навантаження (активне і реактивне) визначається зі співвідношень:

$$P_p = K_n \cdot P_n, \quad (2.1)$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.2)$$

де  $P_n$  – установлена сумарна потужність усіх електроприймачів цеху;

$K_n$  – коефіцієнт попиту, приймають за довідниками;

$\operatorname{tg} \varphi$  – приймається за відповідним коефіцієнтом потужності.

Розрахункове повне навантаження (з урахуванням навантаження освітлення) можна визначити:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{p.o.})^2 + Q_p^2}. \quad (2.3)$$

Вихідні дані та отримані результати розрахунків за вище наведеними формалами наведено в табл. 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1

*Характеристики споживачів електроенергії  
електромеханічного заводу м. Мукачево*

№ за планом	Найменування споживачів електроенергії	Силове електричне навантаження				
		$P_n$ , кВт	$K_n$	$\cos\varphi/\text{tg}\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар
1	2	3	4	5	6	7
1	Механічна дільниця	2870	0,85	0,84 / 0,65	2440	1586
2	Адміністративна будівля	1440	0,7	0,97 / 0,25	1008	252
3	Їдальня	537	0,9	0,93 / 0,39	483	188
4	Дільниця оброблення валів роторів	1011	0,85	0,88 / 0,53	859	455
5	Складальний цех	1013	0,4	0,9 / 0,48	405	195
6	Намотувальна дільниця	649	0,75	0,87 / 0,57	487	228
7	Виготовлення фреонових двигунів	265	0,85	0,85 / 0,62	225	140
8	Ремонтна дільниця механічного цеху	1111	0,85	0,63 / 1,22	944	1152
9	Штампувальний цех	1617	0,9	0,8 / 0,73	1456	1063
10	Інструментальний цех	1888	0,85	0,8 / 0,73	740	517
11	Цех електродвигунів	6291	0,85	0,86 / 0,59	5348	3155
12	Електричний цех	286	0,65	0,66 / 1,11	186	206
13	Заготівельний цех	1514	0,7	0,89 / 0,51	1760	880
14	Цех спецобладнання	1035	0,85	0,95 / 0,32	880	282
15	Складання двигунів спеціального призначення	516,5	0,4	0,9 / 0,48	207	100
16	Склади	424	0,3	0,78 / 0,8	127	102
17	Виробничий корпус	2365	0,65	0,89 / 0,51	1538	784
	Разом по підприємству	25833	–	–	18646	11969

Таблиця 2.2

*Визначення розрахункових освітлювальних навантажень для цехів підприємства*

№ за планом	Найменування споживачів	Освітлювальне навантаження					Силowe й освітлювальне навантаження разом		
		F, м <sup>2</sup>	P <sub>пит. ос</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	P <sub>но</sub> , кВт	K <sub>по</sub>	P <sub>ро</sub> , кВт	P <sub>p</sub> +P <sub>ро</sub> , кВт	Q <sub>p</sub> , квар	S <sub>p</sub> , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Механічна дільниця	529	19	101	0,85	86	2525	1586	2982
2	Адміністративна будівля	662	27	18	0,85	15	1023	252	1054
3	Їдальня	467	20	9	0,85	8	491	188	525
4	Дільниця оброблення валів роторів	2102	17	36	0,85	31	890	455	1000
5	Складальний цех	2536	17	43	0,85	37	442	195	483
6	Намотувальна дільниця	3210	17	55	0,85	46	533	228	580
7	Виготовлення фреонових двигунів	662	17	11	0,85	10	235	140	273
8	Ремонтна дільниця механічного цеху	1896	19	36	0,85	31	948	1152	1509
9	Штампувальний цех	4586	17	78	0,85	66	1522	1063	1856
10	Інструментальний цех	3650	13	48	0,85	40	780	517	936
11	Цех електродвигунів	1999	17	51	0,85	43	5391	3155	6246
12	Електричний цех	1433	17	24	0,85	21	206	206	292
13	Заготівельний цех	1200	17	20	0,85	17	1777	898	1991
14	Цех спецобладнання	1094	17	19	0,85	16	896	282	939
15	Складання двигунів спеціального призначення	625	17	11	0,85	9	216	99	237
16	Склади	1940	19	37	0,95	35	162	102	191
17	Виробничий корпус	919	17	16	0,85	13	1551	784	1738
Територія підприємства		429377	0,22	94	1	94	94	–	–
Разом по підприємству		35273	–	706	–	618	19682	11969	23035

Оскільки трансформатори цехових підстанцій і високовольної мережі ще не підібрані, орієнтовні втрати потужності в них можна визначити за формулами:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_P^H, \quad (2.4)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot S_P^H, \quad (2.5)$$

$$\Delta P_{\text{Л}} = 0,03 \cdot S_P^H, \quad (2.6)$$

де  $S_P^H$  – розрахункова повна потужність підприємства на шинах напругою 0,4 кВ. За максимально завантажену зміну вона складає 22541 кВА.

Тоді за (2.4), (2.5) та (2.6) отримаємо

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 22541 = 451 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot 22541 = 2254 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{Л}} = 0,03 \cdot 22541 = 676 \text{ кВт}.$$

Сумарна розрахункова (активна та реактивна) потужність, приведена до шин головної понижувальної підстанції (ГПП) напругою 10 кВ, визначається за формулами:

$$P_{P\Sigma} = \sum P_P \cdot K_{PM} + P_{P.O.} + \Delta P_T + \Delta P_{\text{Л}}, \quad (2.7)$$

$$Q_{P\Sigma} = \sum Q_P^H \cdot K_{PM} + \Delta Q_T, \quad (2.8)$$

де  $K_{PM} = 0,95$  – коефіцієнт максимуму навантаження окремих груп електроспоживачів.

$$P_{P\Sigma} = 18646 \cdot 0,95 + 618 + 451 + 676 = 19459 \text{ кВт};$$

$$Q_{P\Sigma} = 11969 \cdot 0,95 + 2254 = 13624 \text{ квар}.$$

Втрати потужності в трансформаторах головної понижувальної підстанції обчислюємо за формулами:

$$\Delta P_{T \text{ ГПП}} = 0,02 \cdot S_{P\Sigma}, \quad (2.9)$$

$$\Delta Q_{T \text{ ГПП}} = 0,1 \cdot S_{P\Sigma}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } S_{P\Sigma} = \sqrt{(P_{P\Sigma})^2 + (Q_{P\Sigma})^2} = \sqrt{19459^2 + 13624^2} = 23754 \text{ кВА};$$

$$\Delta P_{T \text{ ГПП}} = 0,02 \cdot 23754 = 475 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{T\text{ ГПП}} = 0,1 \cdot 23754 = 2375 \text{ квар.}$$

Повна розрахункова потужність підприємства з боку ВН трансформаторів ГПП визначається:

$$S_{P\text{ ГПП}} = \sqrt{(P_{P\Sigma} + \Delta P_{T\text{ ГПП}})^2 + (Q_{P\Sigma} + \Delta Q_{T\text{ ГПП}} - Q_{KY})^2}, \quad (2.11)$$

де  $Q_{KY} = Q_{P\Sigma} - Q_C$ , – потужність компенсуючих пристроїв;

$Q_C$  – найбільше значення реактивної потужності, що може бути передане з мережі енергосистеми в мережу підприємства у режимах найбільших активних навантажень енергосистеми  $Q_C = \alpha \cdot P_{P\Sigma}$ ,  $\alpha = 0,24$  – для підприємств України при напрузі живильної мережі 35 кВ.

Тоді,

$$Q_C = 0,24 \cdot 19459 = 4670 \text{ квар;}$$

$$Q_{KY} = 13624 - 4670 = 8954 \text{ квар;}$$

$$S_{P\text{ ГПП}} = \sqrt{(19459 + 475)^2 + (13624 + 2375 - 8924)^2} = 21142 \text{ кВА.}$$

## 2.2. Картограма навантаження й визначення центру електричних навантажень

Картограма навантаження являє собою ряд кіл різного радіусу, нанесених на відповідні цехи на генеральному плані підприємства. Площі цих кіл в обраному масштабі відповідають навантаженням цехів, що дає можливість наочно представити розподіл електричних навантажень по цехам підприємства. Побудова цих кіл проводиться для кожного цеху на генплані, при цьому центр кожного побудованого кола має збігатися з центром відповідного цеху.

Центр електричних навантажень (ЦЕН) є умовним центром споживання електричної енергії.

Основною метою проведення розрахунків при цьому є визначення радіусів кіл картограми навантажень і координат ЦЕН.

Вихідними даними є координати центрів цехів підприємства, визначаються за генпланом, вважаючи лівий нижній кут території підприємства початком

координат, а також значення розрахункового навантаження силових і освітлювальних навантажень.

$$P_{pi} = \pi r_i^2 m, \quad (2.12)$$

де  $r_i$  – радіус кола, що відповідає  $i$ -му цеху, мм;

$m$  – масштаб для визначення площі кола, він приймається постійним для всіх цехів підприємства, кВт/мм<sup>2</sup>.  $m=1$  кВт/мм<sup>2</sup>.

Радіус кола для кожного цеху визначаємо за формулою:

$$r_i = \sqrt{\frac{P_{pi}}{\pi \cdot m}}. \quad (2.13)$$

Силові навантаження напругою до та понад 1 кВ представлені окремими колами або секторами в колі. Будемо вважати, що навантаження на цех розподілені рівномірно, тому центр навантажень буде знаходитися в центрі ваги фігури, що зображує цех на загальному плані.

Освітлювальне навантаження включається в загальне навантаження цехів і наноситься у вигляді сектора кола, що зображує навантаження до 1 кВ. Кут сектора ( $\alpha$ ) є пропорційним частці розрахункового освітлювального навантаження  $P_{p.o}$  у сумарному розрахунковому навантаженні цеху й визначається із співвідношення загального розрахункового та освітлювального навантажень цехів, за формулою:

$$\alpha_i = \frac{360 \cdot P_{p.o.i}}{P_{pi}}. \quad (2.14)$$

Картограму навантажень будуємо на кресленні генерального плану підприємства за отриманими даними згідно табл. 2.3.

На генеральний план підприємства наносимо осі координат і визначаємо значення центру кіл ( $X_i$  та  $Y_i$ ). Координати центру електричних навантажень підприємства  $X_o$  й  $Y_o$  визначаємо за формулами:

$$X_o = \frac{\sum P_{Pi} \cdot X_i}{\sum P_{Pi}}, \quad (2.15)$$

$$Y_O = \frac{\sum P_{Pi} \cdot Y_i}{\sum P_{Pi}} \quad (2.16)$$

Таблиця 2.3

Розрахункові дані для побудови картограми навантажень

№ за планом	$P_{Pi}$ , кВт	$P_{POi}$ , кВт	$r$ , мм	$\alpha$ , град	$X_i$ , м	$Y_i$ , м	$P_{Pi} \cdot X_i$ , кВт·м	$P_{Pi} \cdot Y_i$ , кВт·м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2440	85	28	12	125	263	310690	654544
2	1008	15	18	5	193	263	194040	264600
3	483	8	12	6	249	256	120055	123775
4	859	31	17	13	237	204	203864	177999
5	405	37	11	33	218	258	88496	104663
6	486,98	47	13	34	185	204	89994	99198
7	225,25	10	9	15	180	130	40523	29328
8	944	31	17	12	172	240	161927	226698
9	1456	67	22	16	116	203	168110	295467
10	740	40	15	20	30	235	22272	174032
11	5347	43	41	3	116	74	617622	393032
12	186	21	8	40	107	139	19876	25724
13	1760	17	24	4	239	140	421296	246372
14	87975	16	17	7	180	61	158267	53577
15	207	9	8	16	239	14	49460	2892
16	127,32	35	7	99	167	86	21212	10962
17	1537,51	13	22	3	306	8	470324	12915
<b>Разом</b>	<b>19145</b>	–	–	–	–	–	<b>3158028</b>	<b>2895774</b>

$$X_O = \frac{\sum P_{Pi} \cdot X_i}{\sum P_{Pi}} = \frac{3158028}{19145} = 165 \text{ м}$$

$$Y_O = \frac{\sum P_{Pi} \cdot Y_i}{\sum P_{Pi}} = \frac{2895774}{19145} = 152 \text{ м}$$

Місце розміщення головної понижувальної підстанції вибираємо із урахуванням таких факторів:

1. Найкоротшою довжиною лінії підведення електричної енергії.
2. По можливості максимальне наближення ГПП до центру електричних навантажень.
3. Можливість вільного введення фідерних ліній і відводів всередину площі.
4. Відповідно до ПУЕ відкритий розподільчий пристрій ГПП необхідно будувати на відстані 60 м від приміщень з вибухонебезпечним середовищем та на відстані 80 м від вибухонебезпечних зовнішніх установок.

Виходячи з перерахованих вище умов, побудуємо ГПП з центром у точці з координатами:  $X'_O = 204,5 \text{ м}$ ;  $Y'_O = 122,5 \text{ м}$ .

У графічній частині магістерської роботи показано розташування ГПП, ЦЕН та картограми навантаження.

### 3. ВИБІР ЧИСЛА ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ГПП

Важливе значення для раціональної побудови схеми електропостачання має правильний технічно та економічно обґрунтований вибір кількості та потужності трансформаторів ГПП.

Вибір потужності трансформаторів ГПП здійснюється за розрахунковою потужністю установки з урахуванням коефіцієнта завантаження трансформатора в нормальному та післяаварійному режимах, а також з урахуванням перевантажувальної здатності трансформатора.

При виході з ладу одного трансформатора той, що залишається в роботі, повинен забезпечити роботу підприємства під час заміни несправного трансформатора з урахуванням можливого обмеження навантаження без шкоди для основної діяльності підприємства. Основні споживачі електроенергії на підприємстві відносяться до II категорії по надійності електропостачання, що свідчить про необхідність встановлення двох трансформаторів на ГПП.

Потужність трансформаторів визначається за формулою:

$$S_{PT} = \frac{S_{PГПП}}{2 \cdot K_3}, \quad (3.1)$$

де  $S_{PГПП}$  – повна розрахункова потужність підприємства з боку високої напруги трансформаторів ГПП;

$K_3$  – коефіцієнт завантаження трансформаторів, приймається для електроспоживачів II-ї категорії 0,7;

2 – число трансформаторів.

Тоді,

$$S_{PT} = \frac{S_{PГПП}}{2 \cdot K_3} = \frac{21142}{2 \cdot 0,7} = 15102 \text{ кВА}.$$

Вибираємо трансформатор із ряду номінальних потужностей двообмоткових силових трансформаторів за умови, що  $S_{HT} \geq S_{PT}$ . Встановлюємо трансформатор з найближчим більшим значенням номінальної потужності, тобто 16000 кВ·А.

Визначаємо коефіцієнт завантаження одного трансформатора в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{S_{PГПП}}{2 \cdot S_{HT}} = \frac{21142}{2 \cdot 16000} = 0,66 .$$

Враховуючи те, що в нормальному режимі коефіцієнт завантаження трансформаторів ГПП приймається рівним 0,7, а в аварійному режимі кожен з трансформаторів з урахуванням допустимого перевантаження (до 40 %) повинен забезпечувати повністю необхідну потужність підприємства, тобто:  $S_{PГПП} < 1,4 S_{HT}$ .

$$S_{PГПП} < 1,4 S_{HT} \Rightarrow 21142 < 22400.$$

де 22400 – потужність, що передається одним трансформатором в післяаварійному режимі:  $1,4 \cdot S_{HT} = 1,4 \cdot 16000 = 22400$  кВ·А, та забезпечить на перспективу можливість розширення виробництва.

## **4. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГИ НА ПІДПРИЄМСТВІ**

### **4.1. Вибір оптимальної напруги живлення підприємства**

Вибір напруги здійснюється з метою визначення параметрів лінії електропередачі (ЛЕП) і обраного обладнання ГПП, а також розміру капітальних вкладень, витрат кольорового матеріалу, величини втрат електроенергії. та експлуатаційні витрати.

Електропостачання підприємства здійснюється безпосередньо від підстанції, що розташована на віддалі 900 м від ГПП підприємства. Від джерела живлення маємо можливість отримання енергії на двох напругах: напругою 35 кВ та 110 кВ. Розглянемо можливість використання обох варіантів шляхом техніко-економічного порівняння їх та вибираємо найбільш оптимальний з них.

#### ***1-ий варіант (електропостачання на напрузі 35 кВ)***

Електропостачання здійснюємо по дволанцюговій ЛЕП.

Визначаємо значення струму, що протікає по одній лінії за формулою:

$$I_M = \frac{S_P}{2\sqrt{3} \cdot U_{ном}} , \tag{4.1}$$

де  $I_M$  – значення розрахункового струму однієї лінії в нормальному режимі роботи;  $U_{ном}$  – номінальна напруга мережі.

$$I_M = \frac{S_P}{2\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{21142}{2\sqrt{3} \cdot 35} = 174 \text{ А.}$$

Переріз проводів ЛЕП у мережах напругою понад 1 кВ вибираємо, згідно ПУЕ за економічною густиною струму:

$$S_{ЕК} = \frac{I_M}{J_{ЕК}}, \quad (4.2)$$

де  $J_{ЕК}$  – економічна вигідна густина струму для заданих умов роботи, приймається за табл. 2.1 [2],  $J_{ЕК}=1,4 \text{ А/мм}^2$ .

$$S_{ЕК} = \frac{I_M}{J_{ЕК}} = \frac{174}{1,4} = 124 \text{ мм}^2$$

Отриманий переріз заокруглюємо до найближчого стандартного, а потім його перевіряємо.

Вибираємо найближчий стандартний переріз проводу АС-120 з  $I_{дон} = 380 \text{ А}$ .

За умовою виникнення корони перевірку не проводимо, оскільки даний переріз ( $120 \text{ мм}^2$ ) більше мінімального  $70 \text{ мм}^2$  для напруги 35 кВ.

Перевіримо переріз на післяаварійний струм при відключенні однієї лінії з урахуванням перевантаження:

$$K_{пер} \cdot I_{дон} > I_{м.ав}, \quad (4.3)$$

$$1,3 \cdot 380 > 2 \cdot 174 = 348 \text{ А} \text{ – умова виконується.}$$

Визначаємо вартість втрат електроенергії на один кілометр у дволанцюговій лінії при  $\tau = 2400 \text{ год/рік}$ ,  $C_e = 4 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$ ,  $K_{пит} = 948 \text{ тис. грн/км}$ ,  $\Delta P_{пит} = 140 \text{ кВт/км}$ .

Вартість втрат електроенергії в лініях:

$$C_{35} = 2 \cdot \Delta P_{пит} \cdot K_3^2 \cdot \tau \cdot C_e = 2 \cdot 140 \cdot \left(\frac{174}{380}\right)^2 \cdot 2400 \cdot 4 = 563,6 \text{ тис.грн/рік.}$$

Визначаємо повні витрати, з урахуванням вартості апаратів на підстанції без вартості трансформаторів:

$$З = n \cdot E_{\Sigma O} \cdot (K_{ПС} + K_{АП}) + (C_{35} + E_{\Sigma Л} \cdot K_{пит.}) \cdot L. \quad (4.4)$$

На підстанції у ВРП 35 кВ на кожен лінію встановлено по вимикачу, вартість кожного порядку  $K_{АП} = 720 \text{ тис.грн}$ . На приймальній підстанції

встановлюються два комплекти комутаційної апаратури. Вартість одного комплексу складає  $K_{ПС} = 233,6$  тис.грн. Сумарні відрахування для лінії  $E_{\Sigma Л} = 1,216$  тис.грн. і  $E_{\Sigma ЛРО} = 1,544$  тис.грн – для обладнання.

$$З_{35} = 2 \cdot 1,544 \cdot (233,6 + 720) + (563,6 + 1,216 \cdot 948) \cdot 0,961 = 4621,5 \text{ тис.грн.}$$

### **2-ий варіант (електропостачання на напрузі 110 кВ)**

Електропостачання здійснюємо по дволанцюговій ЛЕП.

Визначаємо значення струму, що протікає по одній лінії:

$$I_M = \frac{S_P}{2\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{21142}{2\sqrt{3} \cdot 110} = 55 \text{ А;}$$

$$S_{ЕК} = \frac{I_M}{J_{ЕК}} = \frac{55}{1,4} = 39,28 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо найближчий стандартний переріз провідника АС – 70 з  $I_{дон} = 265$  А.

Перевіряємо перетин на післяаварійний струм при відключенні однієї лінії з урахуванням перевантаження:  $K_{пер} \cdot I_{дон} > I_{м.ав}$ ,

що відповідає –  $1,3 \cdot 265 > 2 \cdot 55 = 344 > 110$  А.

Визначаємо вартість втрат електричної енергії на один кілометр у дволанцюговій лінії при  $K_{пит} = 1080$  тис.грн/км,  $\Delta P_{пит} = 125$  кВт/км;

$$C_{110} = 2 \cdot \Delta P_{пит} \cdot K_3^2 \cdot \tau \cdot C_e = 2 \cdot 125 \cdot \left(\frac{55}{265}\right)^2 \cdot 2400 \cdot 4 = 103,4 \text{ тис.грн.}$$

Визначаємо повні витрати з урахуванням вартості апаратів на підстанції без вартості трансформаторів.

Вартість одного комплексу апаратів підстанції  $K_{ПС} = 380,8$  тис.грн.; на живильній підстанції  $K_{АП} = 1280$  тис.грн.

$$З_{110} = 2 \cdot 1,544 \cdot (380,8 + 1280) + (103,4 + 1,216 \cdot 1080) \cdot 0,961 = 6490 \text{ тис.грн.}$$

Витрати на електропостачання за першим варіантом менші ніж витрати другого варіанту. Тому з економічних міркувань вибираємо для подальшого розгляду перший варіант, тобто

$$U_H = 35 \text{ кВ,} \quad \text{АС – 120,} \quad I_{дон} = 380 \text{ А.}$$

Перевіримо лінію за втратами напруги.

При  $L_{\Delta U 1\%}=6,4$  км для АС-120 і допустимій втраті напруги, рівній 5 % у нормальному режимі

$$L_{\text{ДОП}} = L_{\Delta U 1\%} \cdot \Delta U_{\text{ДОП}} \cdot K_3 \geq L, \quad (4.5)$$

де  $L_{\Delta U 1\%}$  – довжина лінії при повному завантаженні на 1% втрати напруги, км;

$\Delta U_{\text{доп}}$  – допустима втрата напруги  $\Delta U_{\text{доп}}=5\%$ ,  $\Delta U_{\text{доп ав}}=10\%$ ;

$K_3 = \frac{I_{\text{ДОП}}}{I_P}$  – коефіцієнт завантаження лінії;

$L_{\text{ДОП}}$  – допустима довжина лінії;

$L$  – фактична довжина лінії:

а) У нормальному режимі  $K_3 = \frac{380}{174} = 2,18,$

$$L_{\text{ДОП}} = 6,4 \cdot 5 \cdot 2,18 = 69,76 \gg 0,961 \text{ км},$$

б) В аварійному режимі  $K_3 = \frac{1,3 \cdot 380}{2 \cdot 174} = 1,4;$

$$L_{\text{ДОП}} = 6,4 \cdot 10 \cdot 1,4 = 89,6 \gg 0,961 \text{ км}.$$

Отже, вибраний переріз провідника задовільняє умові допустимої втрати напруги в нормальному й післяаварійному режимах.

Перевіримо провід за механічною міцністю.

Згідно з ПУЕ для ЛЕП з напругою 35 кВ за механічною міцністю переріз проводу має бути не менше  $75 \text{ мм}^2$ , а в нашому випадку він становить  $120 \text{ мм}^2$ , тобто відповідає умові механічної міцності проводів.

Перевірку перерізу проводів за умовою термічної стійкості, виконаємо після розрахунку струмів короткого замикання.

## 4.2. Вибір схеми зовнішнього електропостачання підприємства

Електропостачання підприємства здійснюємо по дволанцюговій ЛЕП з установкою на ГПП двох трансформаторів, оскільки в нас переважно споживачі II-ої категорії за надійністю електропостачання. Вибираємо схему двох блоків

трансформатор-лінія, які для більшої гнучкості з'єднані між собою неавтоматичною перемичкою з двох роз'єднувачів. У нормальному режимі один з роз'єднувачів розімкнутий.

Основна перевага схеми – економічність і надійність.

У колах силових трансформаторів встановлюємо вимикачі й короткозамикачі з роз'єднувачами. Вибрану нами схему наведено на рис. 4.1.

Отже, зовнішнє електропостачання здійснюємо по дволанцюговій ЛЕП на напругу 35 кВ з установкою на ГПП двох силових трансформаторів типу ТДН-16000/35 з такими параметрами:  $S_H=16000$  кВ·А;  $U_{BH}=36,75$  кВ;  $U_{HH}=10,5$  кВ;  $\Delta P_{XX}=21$  кВт;  $\Delta P_{K3}=90$  кВт;  $i_{XX}=0,75\%$ ;  $U_K=8\%$ .

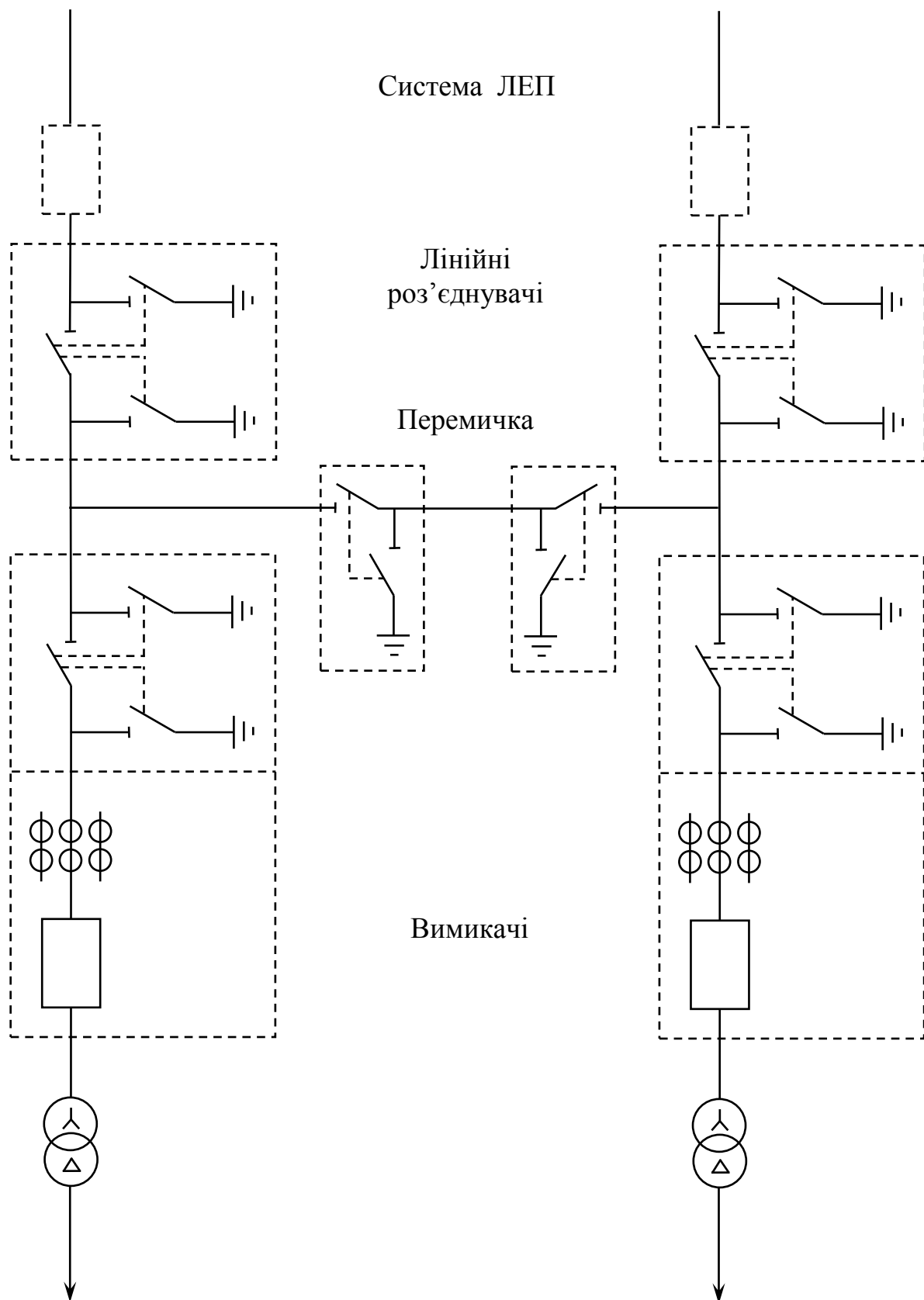


Рис. 4.1. Схема відкритого розподільчого пристрою ГПП

## 5. ВИБІР ЧИСЛА ТА ПОТУЖНОСТІ ЦЕХОВИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

### 5.1. Вибір числа та потужності цехових трансформаторів

Вибір схеми внутрішньозаводської електромережі починають з визначення кількості та потужності цехових трансформаторів.

При установці групи цехових трансформаторів на великих промислових підприємствах їх номінальна потужність визначається густиною навантаження і вибирається, як правило, однаковою для всієї групи. Питома густина навантаження визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{S_P^H}{F_{цехів}}, \quad (5.1)$$

де  $F_{цехів}$  – площа цехів підприємства 35273 м<sup>2</sup> (див. табл. 2.2);

$S_P^H$  – сумарне розрахункове навантаження цехів складає 22541 кВ·А.

$$\sigma = \frac{S_P^H}{F_{цехов}} = \frac{22541}{35273} = 0,64 \text{ кВА/м}^2.$$

При такій густині навантаження відповідно потрібно застосовувати трансформатори потужністю  $S_{НТР}=2500$  кВА. Однак практика показала, що як правило, на трансформаторних підстанціях підприємств встановлюють трансформатори з номінальною потужністю  $S_{НТР} \leq 1000$  кВА, оскільки застосування трансформаторів  $S_H=2500$  кВА призводить до збільшення втрат активної потужності, тому вибираємо трансформатори типу ТМ-1000/10.

Визначаємо мінімально можливе число трансформаторів за формулою:

$$N_C = \frac{\sum P_P^H}{\beta_T \cdot S_{НТР}}, \quad (5.2)$$

де  $\beta_T=0,7$  – коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі,

$\sum P_P^H$  – загальна активна потужність підприємства на напрузі 0,4 кВ.

Економічно обгрунтоване оптимальне число цехових трансформаторів, виберемо з урахуванням компенсації реактивної потужності. Для цього складаємо баланс реактивної потужності.

## 5.2. Баланс реактивної потужності

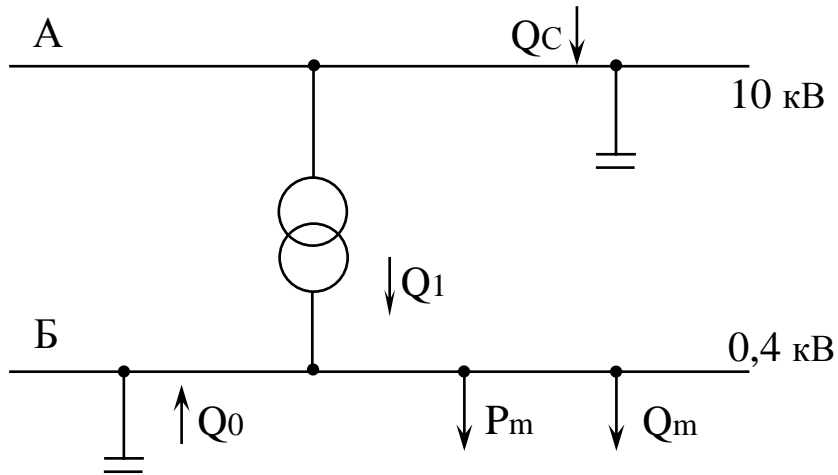


Рис. 5.1. Розподіл реактивної потужності

1. Визначаємо оптимальну потужність трансформаторів і конденсаторних батарей на напрузі 10 та 0,4 кВ. Прийmemo вартість ввідного пристрою  $З_{B1} = 5360$  тис.грн. Витрати на конденсаторні батареї на напрузі 10 кВ  $З_{11} = 12,8$  тис.грн/Мвар, а для конденсаторних батарей напругою 0,4 кВ  $З_{10} = 24$  тис.грн/Мвар.

а)  $S_{HTP} = 2500$  кВА

$$N_{min} = \frac{18645,96}{0,7 \cdot 2500} = 11 \text{ трансформаторів.}$$

Обчислимо найбільшу потужність, що може бути передана в мережу напругою 0,4 кВ за формулою:

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta_T \cdot S_{HTP})^2 - P_P^2} \quad (5.3)$$

$$Q_1 = \sqrt{(11 \cdot 0,7 \cdot 2500)^2 - 18646^2} = 4784 \text{ квар.}$$

Необхідна потужність батареї конденсаторів, що встановлена в мережі напругою 0,4 кВ, для повної компенсації реактивної потужності визначається як:

$$Q_O = Q_P - Q_1 = 11969 - 4784 = 7185 \text{ квар.}$$

Тоді, розрахункові витрати для цього варіанту становитимуть:

$$З_I = З_{B1} + З_{11} \cdot Q_1 + З_{10} \cdot Q_O = 5360 + 12,8 \cdot 4,784 + 24 \cdot 7,184 = 5594 \text{ тис.грн.}$$

б)  $S_{HTP}=1000$  кВ·А

$$N_{min} = \frac{18646}{0,7 \cdot 1000} = 27 \text{ трансформаторів.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(27 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 18646^2} = 3088 \text{ квар;}$$

$$Q_0 = 11969 - 3088 = 8881 \text{ квар.}$$

Витрати для другого варіанту становитимуть:

$$Z_{II} = 5360 + 12,8 \cdot 3,088 + 24 \cdot 8,880 = 5574 \text{ тис.грн.}$$

Отже, у результаті техніко-економічного порівняння варіантів видно, що доцільно на цехових трансформаторних підстанціях (ТП) встановлювати трансформатори з номінальною потужністю 1000 кВ·А ( $S_{HTP} = 1000$  кВ·А).

2. Вибираємо оптимальне число трансформаторів.

Реактивна потужність, що передається системою, обчислена у розділі 2 кваліфікаційної роботи  $Q_C = 4670$  квар. Вище також було визначено, що на підстанціях підприємства встановлюються трансформатори 10/0,4 потужністю  $S_H = 1000$  кВА. Вартість установки батареї конденсаторів на 0,4 кВ –  $K_y = 96$  грн/кВАр, вартість установки однієї підстанції на 1000 кВА становить  $K_T = 1360000$  грн., питома вартість втрат електроенергії –  $Z_0 = 4$  грн/кВт.

Визначаємо питоми витрати на установлення батареї конденсаторів (БК) у мережі напругою 0,4 кВ.

$$Z_{10} = E \cdot K_y \cdot \left( \frac{\dot{U}}{\dot{U}_{БК}} \right) + C_0 \cdot P_{БК}, \quad (5.4)$$

де  $E = 0,12$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

$K_y$  – питома вартість установки БК (для напруги до 1 кВ  $K_y=96000$  грн/Мвар);

$\dot{U}$ ,  $\dot{U}_{БК}$  – відповідно, відносна напруга мережі й батареї конденсаторів;  $P_{БК}$  – питоми втрати активної потужності в батареї конденсаторів (для  $U \leq 1$  кВ  $P_{БК} = 4,5$  кВт/Мвар).

$$Z_{10} = 0,12 \cdot 96000 \cdot \left( \frac{1}{1} \right)^2 + 4 \cdot 4,5 = 11538 \text{ грн.}$$

Витрати на установку однієї ТП потужністю  $S_{HTP} = 1000$  кВА

$$Z_{TP} = E \cdot K_T = 0,12 \cdot 1360000 = 163200 \text{ грн.}$$

Мінімальне число трансформаторів  $N_{min}=27$  шт;  $Q_1 = 3,088$  Мвар.

Складаємо баланс потужності за Q у вузлі А (рис. 5.1).

$Q_C = Q_1$ ,  $4,67 > 3,088$  (Мвар) – таким чином, установка високовольтних батарей конденсаторів у вузлі А не потрібна, оскільки реактивної потужності в системі більше.

Обчислюємо потужність батареї конденсаторів на стороні напругою 0,4 кВ, виходячи з балансу реактивної потужності у вузлі Б:

$$Q_O = Q_B - Q_1 = 11969 - 3088 = 8881 \text{ квар.}$$

Витрати при мінімальному числі трансформаторів  $N_{min}=27$  шт.

$$Z_I = Z_{10} \cdot Q_O = 11538 \cdot 8,881 = 102,5 \text{ тис. грн.}$$

Збільшуємо число трансформаторів на один ( $N_{min}+1$ ), тоді

$$Q_1 = \sqrt{(28 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 18646^2} = 6040 \text{ квар } 6,04 < Q_B \text{ (Мвар).}$$

Складаємо баланс реактивної потужності у вузлі А

$Q_C = Q_1$ ,  $4,67 < 6,04$  (Мвар), тобто, необхідно встановлювати батареї конденсаторів на стороні напругою 10 кВ.

$$Q_{ВНБК} = Q_1 - Q_C = 6,04 - 4,67 = 1,37 \text{ Мвар.}$$

Обчислюємо потужність батареї конденсаторів на стороні напругою 0,4 кВ

$$Q_O + Q_1 = Q_B, \text{ звідси отримаємо: } Q_O = Q_B - Q_1 = 11,969 - 6,04 = 5,584 \text{ Мвар.}$$

Витрати при другому варіанті ( $N_{min}+1$ )

$$Z_{II} = Z_{10} \cdot Q_O + Z_{32} \cdot Q_{ВНБК} + Z_{TP}, \quad (5.5)$$

де  $Z_{32}$  – питомі витрати на встановлення батареї конденсаторів у точці А (на стороні 10 кВ)  $Z_{32} = 13176$  грн/Мвар.

$$Z_{II} = 11538 \cdot 5,584 + 13176 \cdot 1,37 + 163200 = 245,7 \text{ тис.грн.}$$

Збільшуємо число трансформаторів на два ( $N_{min}+2$ ), тоді

$$Q_1 = \sqrt{(29 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 18646^2} = 8026 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{ВНБК} = Q_1 - Q_C = 8,02 - 4,67 = 3,35 \text{ Мвар;}$$

$$Q_O = Q_B - Q_1 = 11,969 - 8,02 = 3,95 \text{ Мвар};$$

$$Z_{III} = 11538 \cdot 3,95 + 13176 \cdot 3,35 + 163200 = 252,9 \text{ тис.грн.}$$

Із порівняння трьох варіантів випливає, що найбільш оптимальним є другий варіант із  $N_{TP}=28$  шт. Сумарна потужність батареї конденсаторів на стороні напругою 0,4 кВ складає  $Q_O = 5,584$  Мвар.

У закритому розподільчому пристрої напругою 10 кВ ГПП установлюємо 3 конденсатори типу УК-10-450П(Л)УЗ.

Повну потужність батареї конденсаторів на напругу 0,4 кВ розподіляємо по цехових трансформаторних підстанціях пропорційно споживання реактивної потужності згідно з табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Розподіл батареї конденсаторів по ТП (0,4 кВ)

№ ТП	$Q_{pis}$ , квар	$Q_{okis}$ , квар	Тип конденсаторної батареї	Число х потужність
1	2	3	4	5
ТП-1	644	300	УКН - 0,38 – 300 – 50 У3	1x300
ТП-2	228	106	УК - 0,38 – 103 – 3 У3	1x108
КТП-3	1057	493	УКЛН - 0,38 – 300 – 50 У3	2x300
КТП-4	1278	596	УКЛН - 0,38 – 300 – 50 У3	2x300
ТП-5	420	196	УК - 0,38 – 108 – 3 У3	2x108
ТП-6	531	248	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
ТП-7	531	248	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
ТП-8	529	247	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
КТП-9	517	241	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
КТП-10	276	129	УК - 0,38 - 144 – 4 У3	1x144
ТП-11	138	64	УК - 0,38 – 72 – 4 У4	1x72
КТП-12	276	129	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
ТП-13	138	64	УК - 0,38 – 72 – 4 У4	1x72
КТП-14	276	129	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	2x144
КТП-15	178	366	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	3x144
ТП-16	242	113	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	1x144
ТП-17	282	131	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	1x144
КТП-18	898	419	УК - 0,38 – 144 – 4 У3	3x144

Вибираємо трансформатори для установки на підстанціях типу ТМ-1000/10 з технічними даними:

$U_{BH}$	$U_{HH}$	$\Delta P_{xx}$	$\Delta P_{кз}$	$U_{кз}$	$I_{xx}$
10 кВ	0,4 кВ	2,45 кВт	12,2 кВт	5,5%	2,8%

### 5.3. Визначення числа силових трансформаторів для цехових ТП

Активне навантаження, що приходить на один силовий трансформатор визначається по формулі:

$$P_1 = \frac{\sum (P_P + P_{PO})}{N}, \quad (5.6)$$

де  $\sum (P_P + P_{PO})$  – загальне силове й освітлювальне навантаження підприємства, рівне 19682 кВт (див. табл. 2.2);  $N$  – кількість трансформаторів.

$$P_1 = \frac{19682}{28} = 702,9 \text{ кВт.}$$

Число трансформаторів, яке варто встановлювати в тому або іншому цеху:

$$N_i = \frac{P_{Pi} + P_{POi}}{P_1}. \quad (5.7)$$

Результати розрахунків представимо у вигляді табл. 5.2.

Таблиця 5.2

## Визначення кількості цехових трансформаторів

№ за планом	Найменування електроспоживача	$P_P+P_{PO}$ , кВт	N, шт
1	2	3	4
1	Механічна дільниця	2525	3,6
2	Адміністративна будівля	1023	1,5
3	Їдальня	491	0,7
4	Дільниця оброблення валів роторів	890	1,3
5	Складальний цех	415	0,6
6	Намотувальна дільниця	533	0,8
7	Виготовлення фреонових двигунів	235	0,3
8	Ремонтна дільниця механічного цеху	948	1,4
9	Штампувальний цех	1522	2,2
10	Інструментальний цех	780	1,1
11	Цех електродвигунів	5391	7,7
12	Електричний цех	207	0,3
13	Заготівельний цех	1777	2,5
14	Цех спецобладнання	896	1,3
15	Складання двигунів спеціального призначення	216	0,3
16	Склади	162	0,2
17	Виробничий корпус	1551	2,2

Місця розташування трансформаторних підстанцій (ТП) вибрано відповідно до вимог ПУЕ й отриманих даних табл. 5.2, показані на графічному кресленні кваліфікаційної роботи.

## 6. ВИБІР СХЕМИ Й НАПРУГИ ВНУТРІЗАВОДСЬКОЇ МЕРЕЖІ

При побудові схеми електропостачання промислових підприємств необхідно враховувати особливості окремих підприємств (наявність споживачів високої напруги, електроприймачів зі змінним графіком навантаження тощо). Наше підприємство таких особливостей не має.

Раніше нами вибрано силові трансформатори на ГПП типу ТДН-16000/35 з  $U_{\text{HH}}=10,5$  кВ. Тому внутрізаводську електричну мережу виконаємо на напрузі 10 кВ.

Розподіл електричної енергії здійснюємо з закритого розподільчого пункту (ЗРП-10кВ) ГПП, а електроживлення цехів виконаємо з центрального розподільчого пункту (ЦРП-10кВ) за радіальною схемою, що показана на кресленні в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Розподільчу мережу на напругу 10 кВ прокладаємо по території підприємства кабельними лініями в траншеях.

Переріз кабельної лінії вибираємо за економічною густиною струму. Економічно вигідний переріз провідника  $F_{EK}$ , мм<sup>2</sup>, визначаємо за виразом:

$$F_{EK} = \frac{I_P}{J_{EK}}, \quad (6.1)$$

де  $J_{EK}$  – економічна густина струму, А/мм<sup>2</sup>, приймається за довідниковими даними, для нашого випадку приймаємо  $J_{EK} = 1,4$  А/мм<sup>2</sup>, для кабелів з алюмінієвими жилами (згідно табл 2.1 [2]);

$I_P$  – розрахунковий струм провідника в нормальному й аварійному режимах, визначається за формулами:

$$I_P = \frac{S_{Pi}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_H}; \quad (6.2)$$

$$I_{PAB} = \frac{S_{Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (6.3)$$

де  $S_{Pi}$  – розрахункове навантаження трансформаторної підстанції.

Для конкретної ТП підприємства визначаємо розрахункове навантаження.

ТП-1 розміщена на ділянці оброблення валів роторів. Частина навантаження ділянки  $S=525$  кВ·А розподіляється на РП-7 від ТП-2, але до ТП-1 також підключене навантаження їдальні  $S=526$  кВ·А. Отже,

$S_{\text{ТП-1}}=526+1000-525=1001$  кВ·А. Результати розрахунків наведено в табл. 6.1.

Перевірку вибраних кабельних ліній на термічну стійкість виконаємо після розрахунку струмів короткого замикання (КЗ).

Таблиця 6.1

## Переріз кабельних ліній розподільчої мережі на напругу 10 кВ

Номер лінії	Найменування лінії	Кількість ліній	Розрахункова потужність $S_{Pi}$ , кВА	Розрахункове навантаження на одну лінію		Довжина лінії $L$ , км	Спосіб прокладання	Поправочний коефіцієнт прокладки кабеля	Марка й переріз кабелю, вибраного за умовою допустимого нагрівання	Допустиме навантаження на один кабель	
				У нормальному режимі $I_{P, A}$	В аварійному режимі $I_{P, AB, A}$					У нормальному режимі $I_{Дол, A}$	В аварійному режимі $1,3 I_{Дол, A}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Л-І	ГПП-ЦРП	2	21142	610	1220	0,103	В траншеї	0,85	2x NA2XS2Y6/10kV 3(1x240)	920	1196
Л-1	ЦРП-КТП-15	2	1738	50	100	0,166	В траншеї	1	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-2	ЦРП-ТП-1	1	1001	29	58	0,034	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-3	ЦРП-ТП-5	1	237	7	14	0,143	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-4	ЦРП-ТП-2	1	1000	29	58	0,084	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-5	ЦРП-КТП-4	2	1949	56	113	0,128	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	171	222,3
Л-6	ЦРП-КТП-6	2	1142	33	66	0,119	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-7	ЦРП-КТП-3	2	1850	53	107	0,24	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x50)	171	222,3

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Л-8	ЦРП-ТП-8	1	950	27	55	0,231	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-9	ЦРП-ТП-7	1	980	28	56	0,19	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-10	ЦРП-КТП-9	2	936	27	54	0,231	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-11	ЦРП-КТП-10	2	1634	47	94	0,152	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-12	ЦРП-ТП-11	1	817	24	48	0,196	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-13	ЦРП – КТП-12	2	1634	47	94	0,224	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-14	ЦРП-ТП-13	1	817	24	48	0,234	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-15	ЦРП-КТП-14	2	1634	47	94	0,27	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-16	ЦРП-ТП-15	1	429	12	24	0,091	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-17	ЦРП-ТП-16	1	939	27	54	0,144	В траншеї	0,85	NA2XS2Y6/10kV 3(1x35)	145	188,5
Л-18	ЦРП-КТП-17	2	1991	58	116	0,007	В траншеї	1	NA2XS2Y6/10kV 3(1x50)	171	222,3

## **7. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ПОНАД 1 КВ**

Розрахунок струмів короткого замикання проводять для вибору електротехнічних апаратів і струмопровідних частин електроустановок, а також для перевірки провідників на термічну стійкість при коротких замиканнях. Електричні апарати і провідники повинні бути підібрані таким чином, щоб було виключено їх руйнування або пошкодження при проходженні через них максимально великих струмів короткого замикання. Розрахунок проводимо наближеним практичним методом, згідно з рекомендаціями [6] і [7].

Для розрахунків складаємо однолінійну розрахункову схему електричної мережі з вибором і перевіркою електроприладів і проводів на умови короткого замикання, провівши попередній аналіз схеми електричної мережі. У схему розрахунку вносимо всі трансформатори, повітряні та кабельні лінії, що з'єднують джерела живлення з місцем короткого замикання.

Складаємо розрахункову схему (див. рис. 7.1).

На цій схемі є такі умовні позначення:

С – система електропостачання;

WL-1, WL-2 – двохланцюгова ЛЕП, що з'єднує підстанцію енергосистеми та ГПП підприємства;

T-1, T-2 – силові трансформатори ГПП підприємства (ТДН-16000/35);

T-3 – силовий трансформатор ТП-1 (ТМ-1000/10);

T-4, T-5 – силові трансформатори КТП-9 (ТМ-1000/10);

KL-1, KL-2 – кабельні лінії, що з'єднують підстанції ГПП та ЦРП;

KL-3, KL-4, KL-5 – кабельні лінії, що з'єднують підстанції ЦРП та ТП;

ЕП – електроспоживачі на напругу 0,4 кВ.

Розрахунок виконаємо в іменованих одиницях. Для розрахунку струмів короткого замикання складаємо схему заміщення (див. рис. 7.2).

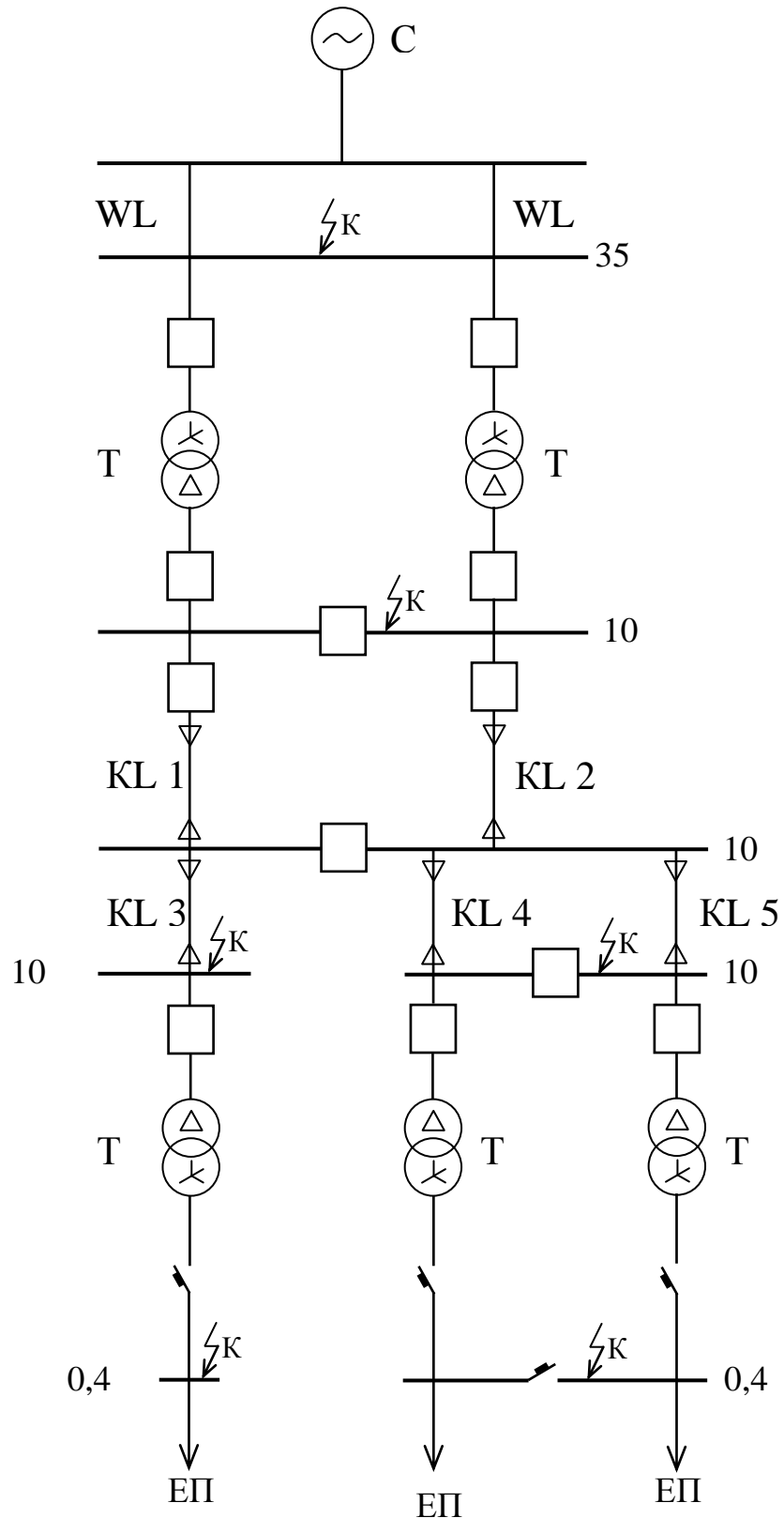


Рис. 7.1. Розрахункова однолінійна схема

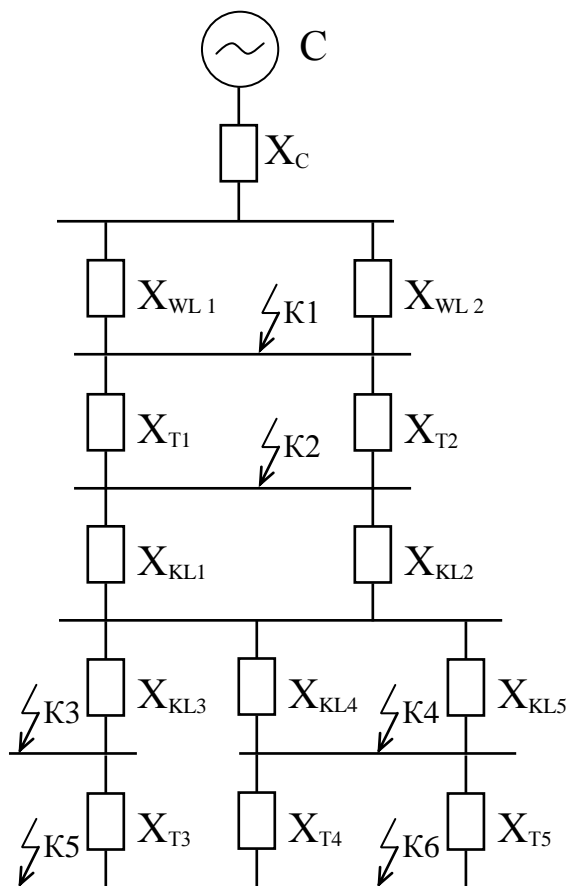


Рис. 7.2. Схема заміщення для розрахунку струмів КЗ

Обчислюємо опори елементів схеми заміщення.

Реактивний опір системи за формулою:

$$X_C = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ВІДКЛ}}}, \quad (7.1)$$

де  $I_{\text{ВІДКЛ}}$  – струм відключення короткого замикання, приблизно приймаємо за елегазовим вимикачем типу ВГГ-35-50/3150 ( $I_{\text{ВІДКЛ}} = 41,3$  кА).

Тоді,

$$X_C = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 41,3} = 0,489 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір повітряних ліній обчислюють за формулою:

$$X_{WL1} = X_{WL2} = \sqrt{(r_0 \cdot l)^2 + (x_0 \cdot l)^2} \quad (7.2)$$

Для сталевалюмінієвого проводу марки АС-120

$$r_0=0,33 \text{ Ом}, \quad x_0=0,353 \text{ Ом}, \quad l=0,961 \text{ км}$$

$$X_{WL1} = X_{WL2} = \sqrt{(0,33 \cdot 0,961)^2 + (0,353 \cdot 0,961)^2} = 0,464 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір трансформаторів:

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_H}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HTP}} \quad (7.3)$$

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{10}{100} \cdot \frac{10500^2}{16 \cdot 10^6} = 0,689 \text{ Ом.}$$

Опри трансформаторів Т3 – Т5 за (7.3):

$$X_{T3} = X_{T4} = X_{T5} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{400^2}{10 \cdot 10^5} = 0,0088 \text{ Ом.}$$

Реактивні опори кабельних ліній:

- що з'єднує ГПП та ЦРП – кабель марки 2х NA2XS2Y6/10kV (3х240)

$$X_{KL1} = X_{KL2} = \frac{x_0 \cdot l}{2} = \frac{0,075 \cdot 0,103}{2} = 0,0039 \text{ Ом.}$$

- для кабеля марки NA2XS2Y6/10kV (3х70)

$$X_{KL3} = x_0 \cdot l = 0,09 \cdot 0,034 = 0,031 \text{ Ом.}$$

$$X_{KL4} = X_{KL5} = x_0 \cdot l = 0,09 \cdot 0,27 = 0,0243 \text{ Ом.}$$

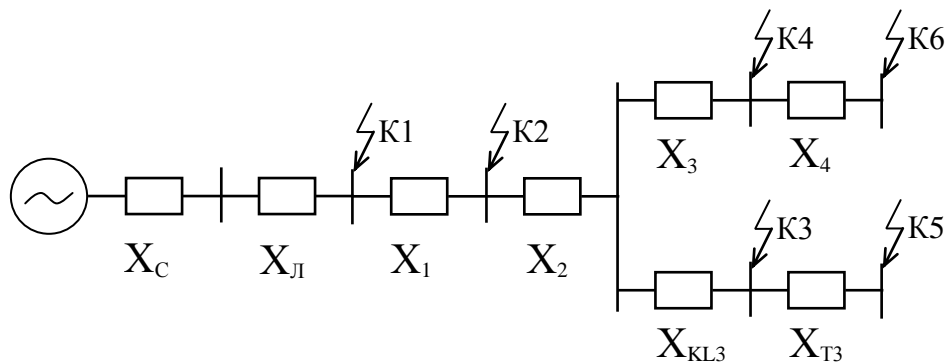


Рис. 7.3. Вигляд схеми заміщення після перетворення

$$X_{JI} = \frac{X_{WL1} \cdot X_{WL2}}{X_{WL1} + X_{WL2}} = \frac{0,464 \cdot 0,464}{0,464 + 0,464} = 0,232 \text{ Ом;}$$

$$X_1 = \frac{X_{T1}}{2} = \frac{0,689}{2} = 0,345 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_{KL1}}{2} = \frac{0,0039}{2} = 0,002 \text{ Ом};$$

$$X_3 = \frac{X_{KL4}}{2} = \frac{0,0243}{2} = 0,0122 \text{ Ом};$$

$$X_4 = \frac{X_{T4}}{2} = \frac{0,0088}{2} = 0,0044 \text{ Ом};$$

$$X_{K1} = X_C + X_L = 0,489 + 0,232 = 0,721 \text{ Ом}.$$

$$I_{K1} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{K1}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 0,721} = 28 \text{ кА}.$$

$$X_{K2} = (X_C + X_L) \cdot \frac{U_B^2}{U_H^2} + X_1 = 0,721 \cdot \frac{10,5^2}{37,5^2} + 0,345 = 0,402 \text{ Ом};$$

$$I_{K2} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{K2}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,402} = 15,08 \text{ кА}.$$

$$X_{K3} = X_{K2} + X_2 + X_{KL3} = 0,402 + 0,002 + 0,031 = 0,435 \text{ Ом};$$

$$I_{K3} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{K3}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,435} = 13,27 \text{ кА}.$$

$$X_{K4} = X_{K2} + X_2 + X_3 = 0,402 + 0,002 + 0,0122 = 0,4162 \text{ Ом};$$

$$I_{K4} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{K4}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,416} = 13,88 \text{ кА}.$$

Визначені в попередньому розділі перерізи кабелів за економічною густиною струму, перевіряємо на термічну стійкість до дії струмів КЗ.

Мінімальний термічно стійкий переріз провідника обчислюють за формулою:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T}, \quad (7.4)$$

де  $B_K = I_\infty^2 \cdot (t_{\text{відкл}} T_a)$  – тепловий імпульс струму короткого замикання,  $A^2 \cdot c$ ;

$T_a$  – постійна часу загасання аперіодичної складової струму короткого замикання, с;

$T_{\text{відкл}} = t_3 + t_6$  – час відключення струму короткого замикання, с;

$t_3$  – час дії основного захисту, с;

$t_6$  – повний час відключення вимикача, с;

$C_T$  – термічний коефіцієнт, залежить від і матеріалу провідника. Для проводів з алюмінієвими жилами  $C_T = 85 A \cdot c^{1/2} / \text{мм}^2$ .

а) Для проводів АС-120  $\text{мм}^2$

$$I_\infty = 28 \text{ кА}; \quad t_3 = 0,09 \text{ с}; \quad t_{\text{відкл}} = 0,02 + 0,09 = 0,11 \text{ с};$$

$$B_K = 28000^2 \cdot (0,11 + 0,05) = 12544000 A^2 \cdot c$$

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{12544000}}{85} \approx 120 \text{ мм}^2;$$

б) Для кабельних ліній

$$I_\infty = 13,88 \text{ кА}; \quad t_3 = 0,08 \text{ с}; \quad t_{\text{відкл}} = 0,08 + 0,02 = 0,1 \text{ с};$$

$$B_K = 13880^2 \cdot (0,1 + 0,05) = 28898160 A^2 \cdot c$$

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{28898160}}{85} \approx 63 \text{ мм}^2.$$

Отже, остаточно приймаємо переріз кабельних ліній  $70 \text{ мм}^2$ .

## **8. ВИБІР ТА ПЕРЕВІРКА АПАРАТІВ У МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ПОНАД 1 КВ**

Усі пристрої та апарати системи електропостачання, ізолятори та струмопровідні пристрої вибираються за умовами тривалої номінальної роботи, режиму перевантаження та можливого режиму короткого замикання; вони можуть бути відкритими і закритими; відповідати екологічним умовам тощо.

Вибрані за номінальним струмом і напругою прилади перевіряють на електродинамічну і термічну стійкість до коротких замикань, на відключаючу здатність; вимірювальні трансформатори струму, крім того, перевіряють на відповідність їх роботи необхідному класу точності. Зазначені розрахункові значення порівнюються з допустимими для даного приладу та складаються порівняльні таблиці заданих розрахункових і допустимих значень. Для надійної безаварійної роботи розрахункові значення повинні бути не менше допустимих, прийнятих за каталогом або паспортом приладу.

Номінальне значення напруги електричного апарату має відповідати його класу ізоляції з деяким запасом за електричною міцністю (порядка 10-15%).

### **8.1. Вибір апаратів ВРП 35 кВ**

Розподільчі пристрої, що розміщуються на відкритому просторі називають відкритими розподільчимим пристроями (ВРП).

Вимикач є основним пристроєм в електроустановках, служить для вмикання і вимикання ланцюга в будь-яких умовах: тривалого навантаження, перевантаження, короткого замикання, холостого ходу, асинхронного режиму роботи. Найбільш складною і відповідальною операцією є відключення струмів КЗ і включення існуючого КЗ.

Роз'єднувачами можна комутувати лише струми холостого ходу. Вони служать для створення видимого розриву. Між силовими вимикачами та роз'єднувачами має бути передбачене механічне і електромагнітне блокування,

що не допускає відключення роз'єднувача при включеному вимикачеві, коли в колі протікає струм навантаження.

Вимикачі навантаження та роз'єднувачі вибираються за напругою і номінальним тривалим струмом.

Обчислимо розрахунковий струм на ділянці ВРП 35 кВ із урахуванням перевантаження:

$$I_P = \frac{1,4 \cdot S_{НТР}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (8.1)$$

$$I_P = \frac{1,4 \cdot 16000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 369,5 \text{ А.}$$

Перевірку на дію до струмів короткого замикання виконаємо для точки К<sub>1</sub> (див. рис. 7.1).

Результати по перевірці високовольтних вимикачів та роз'єднувачів наведені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Розрахункові дані	Дані за каталогом	
	Вимикач ВГГ-35-50/3150	Роз'єднувач РНДЗ-1-35/1000
$U_{уст}=35 \text{ кВ}$	$U_M=40,5 \text{ кВ}$	$U_H=35 \text{ кВ}$
$I_{р.в}=369,5 \text{ А}$	$I_{ном}=3150 \text{ А}$	$I_{ном}=1000 \text{ А}$
$I_{п.о}=28 \text{ кА}$	$I_{н.відк}=50 \text{ кА}$	
$S_{р.в}=1794 \text{ МВА}$	$S_{н.відк}=2500 \text{ МВА}$	
$i_{уд}=574 \text{ кА}$	$i_{у.н.}=127,5 \text{ кА}$	$i_{дин}=64 \text{ кА}$
$I_{\infty} \sqrt{\frac{t_n}{t_{номтс}}} = 5,7 \text{ кА}$	$I_{тер}=50 \text{ кА}$	$I_{тер}=25 \text{ кА}$

Розрахункова потужність відключення короткого замикання:

$$S_{P.O} = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{H.O} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 28 = 1794,4 \text{ МВ}\cdot\text{А.}$$

$I_{\infty} = 1,52 \cdot I_{H.O} = 1,52 \cdot 28 = 42,56$  кА – розрахунковий усталений струм короткого замикання

$$t_{\Pi} = t_{P.3} + t_{ВДКЛ} = (0,03 + 0,06) = 0,09 \text{ с} \quad t_{НОМ.Т.С} = 5 \text{ с}$$

$$I_{\infty} \cdot \sqrt{\frac{t_{\Pi}}{t_{НОМ.Т.С}}} = 42,56 \cdot \sqrt{\frac{0,09}{5}} = 5,7 \text{ кА.}$$

## 8.2. Вибір апаратів ЗРП 10 кВ та ЦРП

Розподільчі пристрої, що розміщуються всередині приміщень або в приміщеннях цехів називаються закритими розподільчими пристроями. У якості комутаційного елемента у РП використовують високовольтні вимикачі.

Високовольтний вимикач також захищає установку від струмів коротких замикань. Широке застосування в закритих розподільчих пристроях на напругу 10 кВ знайшли вакуумні вимикачі серії ВВ/TEL-10.

Величина розрахункового струму на стороні 10 кВ із урахуванням перевантаження:

$$I_P = \frac{S_{HP}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{23035}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1329 \text{ А.}$$

Перевірку на дію до струмів короткого замикання проводимо струмами КЗ для точки К<sub>2</sub>.

Вибираємо ввідні й секційні вимикачі, а також секційні вимикачі на відходящих лініях від ЦРП до цехових ТП.

Результати перевірки вимикачів наведено в табл. 8.2.

Розрахункові величини	Дані за каталогом вимикача ВВ/TEL-10
$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{р.у}} = 1329 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630; 1000; 1500 \text{ А}$
$I_{\text{п.о}} = 15,08 \text{ кА}$	$I_{\text{н.відкл}} = 20 \text{ кА}$
$S_{\text{р.о}} = 261,193 \text{ МВА}$	$S_{\text{н.відкл}} = 350 \text{ МВА}$
$i_{\text{уд}} = 38,39 \text{ кА}$	$i_{\text{у.н.}} = 52 \text{ кА}$
$I_{\infty} \sqrt{\frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ном.т.с}}}} = 3,22 \text{ кА}$	$I_{\text{тер}} = 20 \text{ кА}$

Розрахункова потужність відключення короткого замикання:

$$S_{\text{р.о}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot I_{\text{п.о}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 15,08 = 261,193 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Розрахунковий ударний струм короткого замикання:

$$i_{\text{уд}} = k_{\text{у}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{к}} = 1,8\sqrt{2} \cdot 15,08 = 38,39 \text{ кА}.$$

Приведений час для періодичної складової струму короткого замикання

$$t_{\text{III}} = 0,05 + 0,08 = 0,13 \text{ с}.$$

Приведений час для аперіодичної складової струму короткого замикання

$$t_{\text{IIA}} = 0,05 + 1,4^2 = 0,098 \text{ с}.$$

$$t_{\text{II}} = t_{\text{III}} + t_{\text{IIA}} = 0,13 + 0,098 = 0,228 \text{ с} \quad t_{\text{ном.т.с}} = 5 \text{ с}$$

$$I_{\infty} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{II}}}{t_{\text{ном.т.с}}}} = 15,08 \cdot \sqrt{\frac{0,228}{5}} = 3,22 \text{ кА}.$$

### 8.3. Вибір та перевірка шинопроводів

Ошиновка виконується твердими алюмінієвими шинами (мідні шини не доцільно використовувати через їх високу вартість). При струмах до 3000 А застосовуються одно- і двострічкові шини.

Підбір перерізу шин виконують за нагріванням (по допустимому струму). При цьому враховуються не тільки нормальні, а й післяаварійні режими, а також режими в ремонтний період і можливість нерівномірного розподілу струмів між секціями шин.

Обчислимо значення розрахункового струму на стороні 10 кВ з врахуванням перевантаження:

$$I_P = \frac{S_{HP}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{23035}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1329 \text{ А.}$$

За довідниковими даними вибираємо алюмінієві шини прямокутного перерізу, що встановлюються на ребро типу АТ-80х10, з допустимим струмом  $I_{\text{доп}}=1480 \text{ А}$ .

Максимальний допустимий струм для вибраних шин:  $I_{\text{доп.макс}} = k_3 \cdot I_{\text{доп}}$  де  $k_3 = 1,05$  – коефіцієнт, що враховує температуру навколишнього середовища  $Q_{o.c}=+15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$I_{\text{доп.макс}} = k_3 \cdot I_{\text{доп}} = 1,05 \cdot 1480 = 1554 \text{ А.}$$

Для достатньої механічної міцності шин при струмах КЗ, розрахункове напруження в шинах не має перевищувати допустиме механічне напруження для вибраного матеріалу або на вигин  $\sigma_{\text{доп}}=650 \text{ кгс/см}$ . Відповідно до системи та конструкції, що зображена на рис. 8.1, максимальне допустиме зусилля на вигин у шинах в залежності від механічного допустимого напруження  $\sigma_{\text{доп}}$  визначають за формулою:

$$F_{\text{доп}} = \frac{10 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot W}{L}, \quad (8.2)$$

де  $W$  – момент опору,  $\text{см}^3$ ;  $L$  – довжина прольоту між ізоляторами,  $\text{см}$ ;

Для однострічкових шин, що розташовуються на ребро, момент опору визначають за формулою:

$$W = 0,17 \cdot h \cdot b^2 = 0,17 \cdot 8 \cdot 1^2 = 1,36 \text{ см}^3.$$

$$F_{\text{доп}} = \frac{10 \cdot 650 \cdot 1,36}{80} = 110,5 \text{ кг}\cdot\text{с.}$$

Обчислюємо розрахункове зусилля від тривалого впливу струму КЗ:

$$F_{\text{розр}} = 1,76 \cdot i_{\text{у.розр}}^2 \cdot \frac{L}{a} \cdot 10^{-2}, \quad (8.3)$$

За умовою  $F_{\text{розр}} \leq F_{\text{доп}}$  випливає

$$1,76 \cdot i_{\text{у.розр}}^2 \cdot \frac{L}{a} \cdot 10^{-2} \leq \frac{10 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot W}{L}; \quad i_{\text{у.розр}} \leq \frac{10}{L} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot W_a}{1,76}}, \text{ (кА)}$$

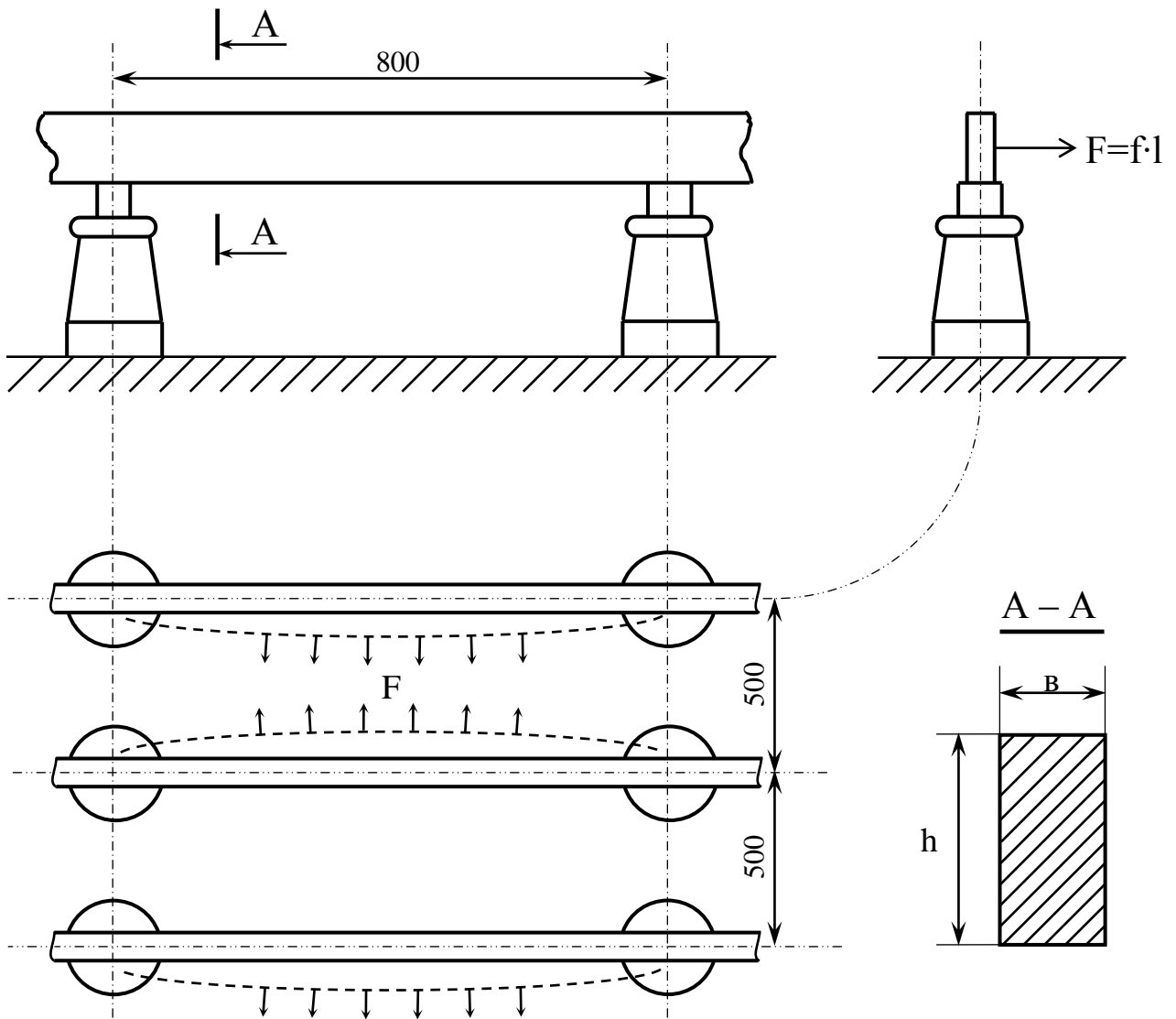


Рис 8.1. Ескіз установлення шин для визначення зусиль при протіканні струмів короткого замикання

Максимальне розрахункове напруження для однострічкових шин визначаємо за формулою:

$$\sigma_{розр} = \frac{F_{розр} \cdot L}{10 \cdot W} \quad (8.4)$$

$$F_{розр} = 1,76 \cdot 38,39^2 \cdot \frac{80}{50} \cdot 10^{-2} = 42,37 \text{ кг} \cdot \text{с} \quad F_{розр}(= 42,37) \leq F_{доп}(= 110,5)$$

$$\sigma_{розр} = \frac{42,37 \cdot 80}{10 \cdot 1,36} = 249,24 < \sigma_{доп} = 650 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{см}.$$

Із розрахунків робимо висновок, що обрані шини за конструкцією та перерізо відповідають умові достатньої механічної міцності при впливу струмів КЗ.

#### 8.4. Вибір та перевірка ізоляторів

В розподільчих пристроях шини кріпляться на опорні, прохідні та підвісні ізолятори. Тверді шини кріплять на опорні ізолятори, вибір яких виконаємо за напругою установки й перевіримо на дію ударного струму КЗ.

$$F_{розр} = 1,76 \cdot 38,39^2 \cdot \frac{80}{50} \cdot 10^{-2} = 42,37 \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

Вибираємо ізолятори типу ОФ-10-37-5, на напругу 10 кВ.

$$F_{доп} = 0,6 \cdot F_{раз} = 0,6 \cdot 375 = 225 \text{ кг} \cdot \text{с} > F_{розр} = 42,37 \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

Перевірка ізоляторів для ЗРП-10 кВ.

$$F_{розр} = 1,76 \cdot 38,7^2 \cdot \frac{80}{50} \cdot 10^{-2} = 42,2 \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

Прохідні ізолятори для введів від силових трансформаторів до ЗРП-10 кВ.

Вибираємо ізолятори типу П-10/5000-4350.

Перевірка:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} = U_{уст} = 10 \text{ кВ}; \quad I_{ном} = 5000 \text{ А} > I_p = 1329 \text{ А};$$

$$F_{доп} = 2550 \text{ кг} \cdot \text{с} > F_p = 42,2 \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

## 8.5. Вибір та перевірка трансформаторів струму

Трансформатори струму вибирають за номінальною напругою, номінальним струмом, навантаженням вторинного кола, що забезпечує похибку у межах паспортного класу точності, за електродинамічною та термічною стійкістю до струмів КЗ.

Трансформатори струму встановлюються:

- на стороні 35 кВ ГПП, на вводах високовольтних вимикачів;
- на вводах у ЗРП-10 кВ;
- на відходящих шинах ЗРП-10 кВ;
- на відходящих шинах ЦРП, на вводах високовольтних вимикачів.

Трансформатори струму вибираємо:

1. за напругою установки,  $U_{уст} \leq U_{н.т.стр.}$  ;
2. за струмом,  $I_{уст} \leq I_{н.т.стр.}$  ;
3. за навантаженням вторинного кола,  $S_{2p} \leq S_{2н.т.стр.}$  .

Перевірку трансформаторів струму виконаємо:

1. за електродинамічною стійкістю,  $i_{уд} \leq i_{дин}$  або  $k_{дин} \geq \frac{i_{уд}}{\sqrt{2} \cdot I_{нт}}$  ;
2. за термічною стійкістю  $K_{т.с} \geq \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{п}}}{I_{нтт} \sqrt{t_{н.т.с}}}$  .

### 8.5.1. Вибір та перевірка трансформаторів струму на стороні 35 кВ ГПП.

Вторинну обмотку трансформаторів струму включаємо на реле струму за схемою, що показана на рис. 8.2.

Вибір трансформаторів струму за навантаженням вторинного кола для забезпечення необхідного класу точності:

$$S_{2н} \geq S_{розр} ,$$

де  $S_{2н} = Z_{2н} \cdot I_{2н}^2$  – номінальне допустиме навантаження вторинної обмотки;

$S_{розр}$  – розрахункове навантаження вторинної обмотки в робочому режимі.

$I_{2H} = 5 \text{ A}$  – номінальний струм вторинної обмотки;

$Z_{2H}$  – повний допустимий опір зовнішнього кола.

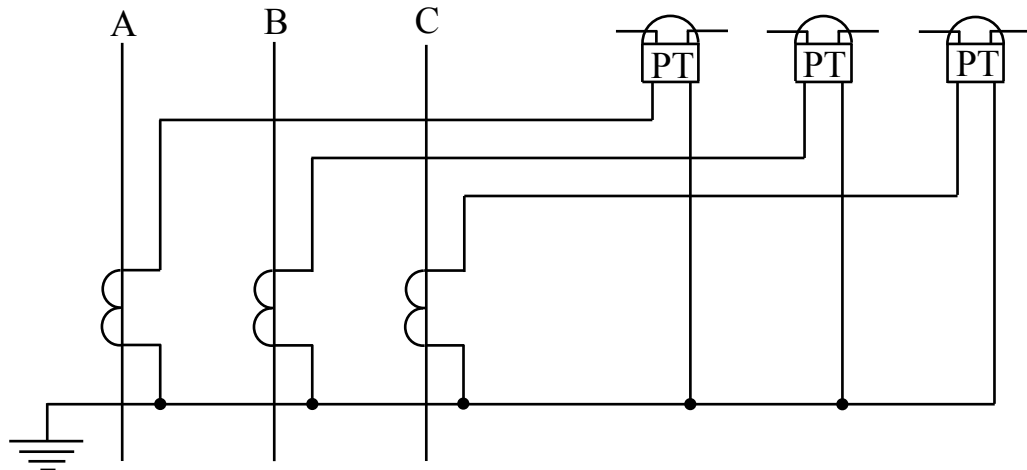


Рис. 8.2. Схема підключення реле струму до вторинної обмотки трансформатора струму

$$Z_{2H} = \sum r_{\text{прил}} + r_{\text{доп}} + r_{\text{конт}},$$

де  $\sum r_{\text{прил}}$  – сума опорів включених послідовно обмоток реле. Для реле струму типу РТ - 40  $I_{2H}=5 \text{ A}$ , а  $S_{\text{ПР}}=10 \text{ В}\cdot\text{А}$ .

$$r_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{10}{25} = 0,4.$$

За напругою та струмом вибираємо трансформатор струму типу ТФНД-35М з параметрами:  $U_{\text{на}} = 35 \text{ кВ}$ ,  $U_{\text{ну}} = 35 \text{ кВ}$ ,

$$I_{\text{на}} = 1500 > I_{\text{ну}} = 1329 \text{ А}, \quad Z_{2H} = 2 \text{ Ом}.$$

Звідси  $r_{\text{доп}} = Z_{2H} + r_{\text{прил}} + r_{\text{конт}}$ ,

Приймаємо опір контактів приладів  $r_{\text{конт}} = 0,1 \text{ Ом}$

$$r_{\text{доп}} = 2 - 0,4 - 0,1 = 1,5 \text{ Ом}.$$

Приймаємо контрольний кабель із алюмінієвими проводами. Питомий опір алюмінієвий провідів  $\rho = 0,0283 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Довжина контрольного кабеля 30 м. Зі схеми з'єднання  $L_{\text{розр}} = L = 30 \text{ м}$ , звідки:

$$S_{розр} = \frac{\rho \cdot L_{розр}}{r_{доп}} = \frac{0,0283 \cdot 30}{1,5} = 0,566 \text{ В} \cdot \text{А}$$

$$S_{2н} = 50 > S_{розр} = 0,566 \text{ В} \cdot \text{А}$$

1. Перевіримо трансформатор струму ТФНД-35М за електродинамічною стійкістю;

$$k_{дин} \geq \frac{i_{у.р}}{\sqrt{2} \cdot I_{нт}} = \frac{57400}{\sqrt{2} \cdot 1500} = 24,7,$$

при значенні граничної кратності при номінальному навантаженні рівному  $k_{дин} = 26$  розрахункове значення вийшло менше, отже трансформатор струму задовільняю умову електродинамічної стійкості.

2. Перевіряємо трансформатора струму ТФНД-35М за термічною стійкістю:

$$K_{т.с} \geq \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{п}}}{I_{нтт} \cdot \sqrt{t_{нт.с}}} = \frac{42560 \cdot \sqrt{0,09}}{1500 \cdot \sqrt{5}} = 3,8 < 80,$$

де  $K_{т.с} = 80$ , отже вибраний трансформатор струму задовільняю умову термічної стійкості.

8.5.2. Вибираємо трансформатори струму на вводах 10 кВ та на відходящих лініях

Визначаємо вторинне навантаження кола трансформаторів струму. На рис. 8.3 зображена схема включення вимірювальних приладів.

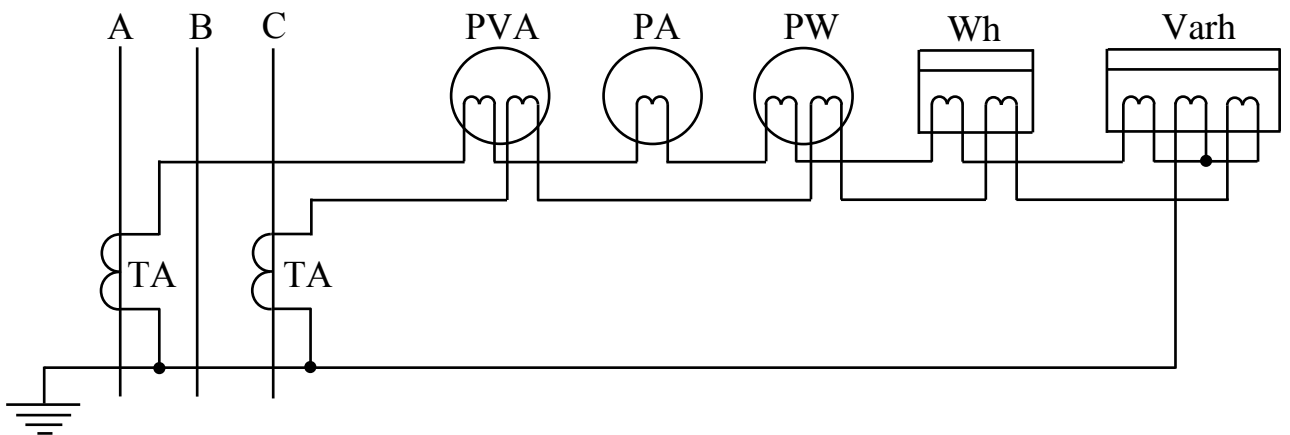


Рис. 8.3. Схема підключення вимірювальних приладів до вторинної обмотки трансформаторів струму

До вторинної обмотки підключаємо амперметр, ваттметр, варметр, лічильники активної та реактивної енергії. Параметри приладів заносимо в табл. 8.3.

Таблиця 8.3

Дані про вимірювальні прилади

Найменування приладу	Тип	Навантаження, В·А		
		А	В	С
Амперметр	ЭЛ-2	1,73	-	-
Ваттметр	Д-585	0,525	-	0,525
Лічильник активної/реактивної енергій	FINTRONIC ФПН-2306	0,245	-	0,245
Варметр	Д-335	0,5	-	0,5
$\Sigma S_{\text{прил}}$		3,275	0	1,545

Знаходимо загальний опір приладів:

$$r_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{3,275}{25} = 0,128 \text{ Ом.}$$

де:  $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$  – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора струму.

Тоді,

$$r_{2\text{ном}} \approx r_{\text{прил}} + r_{\text{доп}} + r_{\text{конт}}$$

де  $r_{2\text{ном}} = 1,2 \text{ Ом}$  – допустимий опір вторинного кола;  $r_{\text{конт}} = 1,2 \text{ Ом}$  – опір контактів;  $r_{\text{доп}}$  – допустимий опір проводів.

$$r_{\text{доп}} = r_{2\text{ном}} - r_{\text{прил}} - r_{\text{конт}} = 1,2 - 0,128 - 0,1 = 0,472 \text{ Ом.}$$

Використовуємо алюмінієвий контрольний кабель. Питомий опір для алюмінію складає  $\rho = 0,0283 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ .

Довжина кабеля 30 метрів ( $L = 30 \text{ м}$ ), тоді з врахуванням схеми з'єднання:

$$L_{\text{розр}} = 1,5 \cdot L = 1,5 \cdot 30 = 45 \text{ м.}$$

Мінімальний переріз кабеля:

$$F_{\text{розр}} = \frac{\rho \cdot L_{\text{розр}}}{r_{\text{доп}}} = \frac{0,0283 \cdot 45}{0,972} = 1,31 \text{ мм}^2.$$

Використовуємо контрольний кабель з перерізом  $2,5 \text{ мм}^2$ , тоді

$$r_{гр} = \frac{1000}{\gamma \cdot F} \cdot L_{розр} = \frac{1000}{32 \cdot 2,5} \cdot 0,045 = 0,526 \text{ Ом.}$$

Визначаємо повний опір вторинного кола:

$$r_{\Sigma 2ном} = r_{прил} + r_{гр} + r_{конт} = 0,128 + 0,562 + 0,1 = 0,79 \text{ Ом.}$$

Розрахункове навантаження вторинного кола:

$$S_p = r_{\Sigma 2н} \cdot I_{2н}^2 = 0,79 \cdot 25 = 19,75 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Результати розрахунків вибору трансформаторів струму зведемо в табл. 8.4.

$$k_{дин} \geq \frac{i_{у.р}}{\sqrt{2} \cdot I_{нт}}, \quad K_{т.с} \geq \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{п}}}{I_{нтт} \cdot \sqrt{t_{н.т.с}}}.$$

Таблиця 8.4

Місце установлення	Тип	Розрахункові величини	Давідникові дані
На лініях, що відходять від ГПП		$U_{уст}=10 \text{ кВ}$	$U_{уст}=10 \text{ кВ}$
		$I_{уст}=723,34 \text{ А}$	$I_{ном}=800 \text{ А}$
	ТПОЛ-10	$k_{дин}=33,74$	$k_{дин}=160$
		$k_{тс}=4,49$	$k_{тс}=10$
		$S_{2р}=19,8 \text{ ВА}$	$S_{2р}=20 \text{ ВА}$
На лініях, що відходять від ЦРП		$U_{уст}=10 \text{ кВ}$	$U_{уст}=10 \text{ кВ}$
		$I_{уст}=114,94 \text{ А}$	$I_{ном}=150 \text{ А}$
	ТПЛ-10	$k_{дин}=150$	$k_{дин}=250$
		$k_{тс}=17,866$	$k_{тс}=25$
		$S_{2р}=19,8 \text{ ВА}$	$S_{2р}=20 \text{ ВА}$

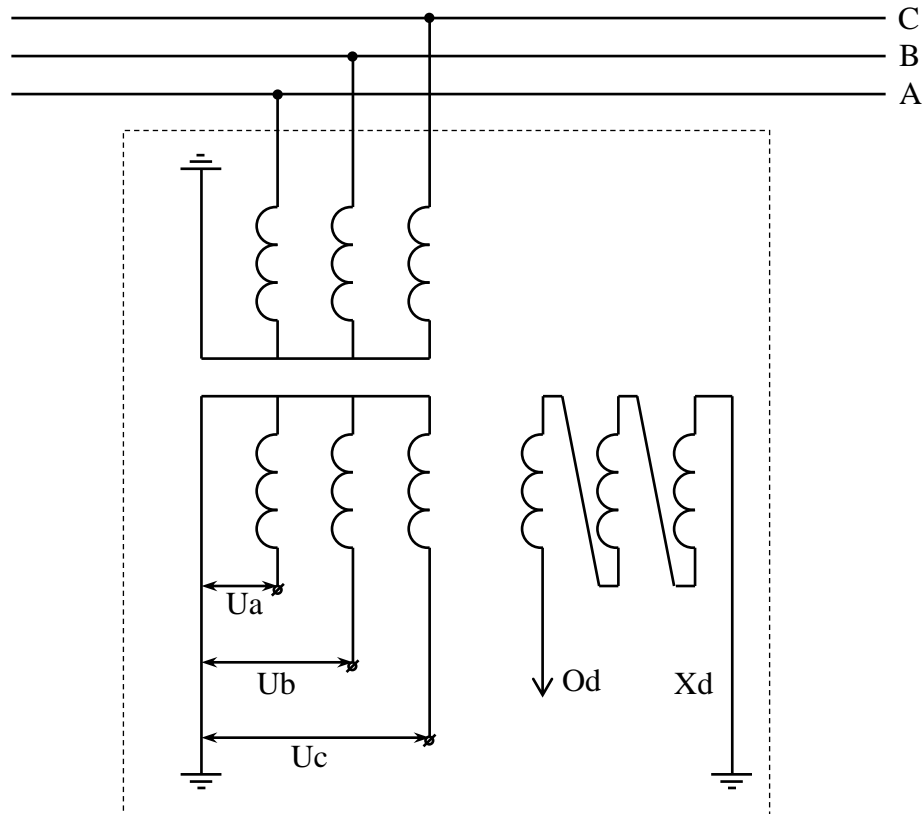
### 8.6. Вибір та перевірка трансформаторів напруги

Трансформатори напруги вибираються за:

1. первинною номінальною напругою  $U_{уст} \leq U_{ном}$ ;
2. за типом та схемою з'єднання обмоток;
3. за похибкою  $N \leq N_{доп}$ ;
4. за вторинним навантаженням.

На кожній секції шин ГПП встановлюємо трифазний, триобмотковий трансформатор напруги типу НТМИ-10-66. Обмотку, що з'єднана в зірку, використовуємо для вимірювальних приладів, а до обмотки, що з'єднана в розімкнутий трикутник, приєднуємо реле захисту від замикання на землю.

Схема з'єднання обмоток представлена на рис 8.4.



*Рис. 8.4. Схема з'єднання обмоток трансформатора напруги  
НТМИ-10-66*

До вторинної обмотки трансформатора напруги підключаємо вольтметр, ваттметр, лічильник активної та реактивної енергії.

Параметри приладів заносимо в табл. 8.5.

Навантаження вторинної обмотки трансформатора напруги (це потужність приладів і реле, підключених до трансформатора напруги):

$$S_{2p} = \sqrt{I^2 + Q^2} = \sqrt{846,36 + 3091,36} = 62,89 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Перевіряємо вибраний трансформатор напруги НТМИ-10-66 із класом точності 0,5.

$$U_{уст} = 10кВ = U_{ном т.н.} = 10кВ$$

$$S_{2р} = 62,9ВА < S_{ном т.н.} = 120ВА .$$

Таблиця 8.5

Дані про вимірювальні прилади

Назва приладу	Тип	Навантаження, В·А	Число котушок	cos φ	Число приладів	Потужність, що споживається	
						P, Вт	Q, вар
Вольтметр	Э-337	2,6	1	1	1	2,6	0
Ваттметр	Д-585	0,5	2	1	1	1	0
Варметр	Д-335	1,5	2	1	1	3	0
Лічильник активної енергії	FINTRONIC ФПН – 2306	1,5	2	1	10	23	53,7
Разом		7,6				29,4	55,6

### 8.7. Вибір та перевірка вимикачів навантаження

З метою здешевлення розподільчого пристрою підстанції замість високовольних вимикачів малої і середньої потужності застосовуються вимикачі навантаження, здатні відключати робочі струми ліній, трансформаторів та інших електроспоживачів. Для відключення струмів короткого замикання, що перевищують допустимі значення для вимикачів навантаження, останні оснащені кварцовими запобіжниками.

У цехових ТП і КТП ми встановлюємо вимикачі навантаження безпосередньо перед трансформаторами, які конструктивно являють собою комбінацію запобіжника і комутаційного апарату, оснащеного дугогасильною камерою.

Відключаючий пристрій, як правило, розрахований на максимальне значення номінального струму запобіжника.

Запобіжники вибираються відповідно до номінального струму, напруги та відключаючої здатності. Номінальні струми запобіжників підбирають так, щоб виключити помилкове спрацьовування запобіжника.

При виборі запобіжника особлива увага приділяється тому, що їх можна використовувати тільки в мережах або установках з напругою, що відповідає його номінальній напрузі.

Вибираємо вимикач навантаження типу ВВП-17 із запобіжником ПК-10/100.

$$U_{\text{ном}}=10 \text{ кВ} = U_{\text{уст}}=10 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{ном}}=100 \text{ А} > I_{\text{уст}}=79 \text{ А};$$

$$I_{\text{дин.}}=12 \text{ кА} > I_{\text{уд}}=11,2 \text{ кА}.$$

Вибір та перевірка проводилися за [1], довідникові дані брали також з [1].

## 9. РОЗРАХУНОК МЕРЕЖІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЦЕХУ

Детально розглянемо систему електропостачання інструментального цеху (за генеральним планом № 10).

Вихідні дані про електроспоживачі цеху наведені у табл. 9.1.

*Таблиця № 9.1*

*Вихідні дані про електроспоживачі інструментального цеху заводу*

Найменування електроспоживача	Тип	Навантаження, Р <sub>н</sub> , кВт	Кількість одиниць	Позначення на плані цеху
1	2	3	4	5
Плоскошліфувальний верстат	ОШ24Ф11Н	4	3	26,27,51
Плоскошліфувальний верстат з підвищеною точністю	ОШ83	3,7	8	15,16,17,18,19, 20,21,25
Плоскошліфувальний верстат	3Г71	2,9	5	29,35,52,53,166
Плоскошліфувальний верстат	3Д711АФ11	1,9	7	28,30,31,32,34, 42,43
Плоскошліфувальний верстат	3Д711АФ10-1	4,8	2	164,165
Токарно-гвинторізний верстат	16К20П	9,9	10	95,96,100,105, 107,112,113, 118,193,199
Токарно-гвинторізний верстат	МК 6056	12	1	123
Токарно-гвинторізний верстат	1Е 61МТ	4,6	13	101,102,103, 106,136,137, 138,139,231, 234,235,236, 237
Токарно-гвинторізний верстат	1М 63	15,2	4	114,115,116, 117
Токарно-гвинторізний верстат	1Е 61МТ	4,7	5	91,92,93,108
Універсально – фрезерний верстат	67К25ПР	5,2	2	128,224

Продовження табл. 9.1

1	2	3	4	5
Універсально-фрезерний верстат	FVW315	3,4	5	81,82,125,195, 196
Універсально-фрезерний верстат	676	1,9	5	79,80,87,99,197
Універсально-фрезерний консультний верстат	6Н13П	12	1	124
Вертикально-фрезерний верстат	6Н13П	14	2	60,97
Вертикально-фрезерний верстат	6Н11П	4,8	5	83,84,85,181, 182
Вертикально-фрезерний верстат	6Н08П	3	4	86,87,173,174
Вертикально-фрезерний верстат з ЧПУ	FKrSPS-500	17	1	232
Горизонтально-фрезерний верстат	6Н62	1,8	2	54,57
Горизонтально-фрезерний верстат	6Н62Г	10	4	61,62,70,229
Оптичний профільошліфувальний верстат	ПС-165	8,4	3	130,131,132
Профільошліфувальний верстат з пантографом	PCM-180	17	1	133
Круглошліфувальний верстат	105 1ЕВ-61	5	1	45
Круглошліфувальний верстат	3А10П	1,5	1	134
Координатно-шліфувальний верстат	S50314	6,2	1	129
Обдирочно-шліфувальний верстат	3М634	1,9	1	6
Обдирочно-шліфувальний верстат	3Б634	5,5	1	37
Внутрішньошліфувальний верстат	НДУ	8,2	1	40
Внутрішньошліфувальний верстат	3А227	5	1	39
Спеціальний заточувальний шліфувальний верстат	АКЕ	1	1	38
Координатний розточувальний верстат	2А45	2,6	2	34,127
Координатний розточувальний верстат	2450	7,2	3	119,120,121

Продовження табл. 9.1

1	2	3	4	5
Радіальний свердлильний верстат	2М55	5,6	1	48
Вертикальний свердлильний верстат	2А125	2,9	3	33,50,59
Вертикальний свердлильний верстат	2Н125	4,6	4	55,243,244, 45
Токарний верстат з ЧПУ	OF2/3	5,6	4	88,89,90,98
Універсально-заточувальний верстат	3А64М	1,8	6	8,9,11,12,13,14
Верстат довбальний	7А 420	3,6	1	104
Копірувальний фрезерний верстат	6А463	3	1	58
Заточувальний верстат	3Б 667	5,4	4	1,2,3,10
Заточувально-полірувальний верстат	36011	2,9	2	4,5
Напівавтомат	3Б 667М	29	1	7
Універсальний фрезерний верстат	СВМ1ФН	5,8	1	202
Кран електричний підвісний	-	6	4	177,178,179,223
Електрична таль	ТЭ-0,5	2,6	3	163,205,225
Кран-балка	-	30,7	1	56
Електроерозійний верстат з цифровою індикацією	4732Ф3	10	4	135,144,145, 146
Електроіскровий верстат з порошковим електродом	4531	2,5	2	142,143
Прошивальний верстат	4Е723	30	2	139,140
Плавильна піч	ВЧГ-1	1,7	11	46,47,49,168, 169,170,171, 181,182,183, 184
Електрична піч опору	СМ3-85	34	11	149,150,151, 152,153,209, 210,218,219, 220,221
Електрична шахтна піч	СД1-16.1	37	8	175,176,184, 185,191,192, 193
Витяжний вентилятор	ВАО-14	7,6	3	вентиляційна

1	3	4	5	6
Витяжний вентилятор	ВАО-10	5,6	1	вентиляційна
Витяжний вентилятор	ВАО-9,5	4	2	вентиляційна
Витяжний вентилятор	ВАО-2,4	1,4	2	вентиляційна
Витяжний вентилятор	ВАО-2,4	1,6	3	вентиляційна
Витяжний вентилятор	ПАО-10	5,6	3	вентиляційна
Витяжний вентилятор	ПАО-14	7,6	3	вентиляційна

### 9.1. Визначення розрахункового електричного навантаження цеху

Методом впорядкованих діаграм розрахуємо розрахункове силове навантаження інструментального цеху. Для цього розділимо електроспоживачі цеху на дві характерні групи:

До групи А відносимо електроспоживачі із змінним графіком навантаження, коефіцієнт використання яких  $K_B < 0,6$ ;

До групи Б відносимо електроспоживачі з постійним графіком навантаження, у яких  $K_B = 0,6$ .

Отримані розрахункові дані заносимо в табл. 9.2.

Середнє активне і реактивне навантаження за найбільшу завантажену зміну для кожної групи електроприймачів визначають за формулами:

$$P_{CM} = K_B \cdot P_{НОМ}, \text{ кВт} \quad (9.1)$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \text{ квар} \quad (9.2)$$

$K_B$  та  $\cos \varphi$  для кожного електроспоживача або групи електроспоживачів беруться за довідниковими даними [1]. Середньовиважений коефіцієнт використання визначаємо за формулою:

$$K_{иср} = \frac{\sum P_{CM}}{\sum P_{НОМ}}, \quad (9.3)$$

де  $\sum P_{CM}$  – середнє сумарне активне навантаження групи електроспоживачів цеху за найбільш завантажену зміну, кВт;

$\sum P_{ном}$  – сумарна встановлена потужність групи електроспоживачів цеху, кВ).

Коефіцієнт максимуму активної потужності визначають за кривими або за таблицями [1] в залежності від середньовиваженого коефіцієнта використання  $K_{всер}$  і ефективного числа електроспоживачів  $n_e$ , для даної групи.

Розрахункові активна  $P$  і реактивна  $Q_m$  потужності групи електроспоживачів із змінним графіком навантаження визначаються за формулами:

$$P_m = K_m \cdot P_{см}, \text{ кВт} \quad (9.4)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт максимуму – визначаємо за [1]. Для електроспоживачів у яких постійний графік навантаження  $P_m = P_{см}$ , оскільки  $K_m=1$ .

Розрахункове освітлювальне навантаження цеху визначаємо за установленою потужністю та коефіцієнтом попиту:

$$P_{р.о.} = K_{по} \cdot P_{н.о.}, \text{ кВт} \quad (9.5)$$

де  $K_{по}=0,85$  (приймаємо за довідником).

Установлену потужність визначаємо як:

$$P_{н.о.} = F \cdot P_{пит.о.}, \text{ кВт} \quad (9.6)$$

де  $P_{пит.о.}$  – питома потужність освітлення, для інструментальних цехів приймаємо  $12 \text{ Вт/м}^2$ , а  $F$  – площа цеху, визначаємо за генеральним планом заводу  $3650,4 \text{ м}^2$ .

$$P_{н.о.} = 3650,4 \cdot 12 = 43804,8 \text{ Вт.}$$

$$P_{р.о.} = 0,85 \cdot 43804,8 = 37234 \text{ кВт.}$$

з урахуванням освітлення визначаємо повне розрахункове навантаження цеху:

$$S = \sqrt{(P_p + P_{р.о.})^2 + Q_p^2} = \sqrt{610437^2 + 434137^2} = 749072 \text{ кВ}\cdot\text{А}$$

Значення розрахункового струму:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (9.7)$$

де  $S_p$  – розрахункове навантаження груп електроспоживачів.

Обчислюємо піковий струм:  $I_{\pi} = i_{\Gamma M} + (I_{\rho} - K_B \cdot i_{\text{НОМ.М}})$ ,

де  $i_{\pi.М}$ ,  $i_{\text{НОМ.М}}$ ,  $K_B$  – відповідно найбільше значення із пускових струмів двигунів в групі, номінальне значення струму та коефіцієнт використання.

а) Для споживачів групи А:

$$I_{\rho} = \frac{639,558}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 923,1 \text{ А}$$

$$i_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{Нмакс}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Н}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,9 \cdot 0,89} = 54 \text{ А}$$

$$i_{\Gamma M} = 5 \cdot i_{\text{НОМ}} = 5 \cdot 54 = 270 \text{ А}$$

$$I_{\pi} = 270 + (923,1 - 0,1 \cdot 54) = 1187,7 \text{ А}$$

б) Для споживачів групи Б:

$$I_{\rho} = \frac{81,482}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 117,6 \text{ А} \quad i_{\text{НОМ}} = \frac{7,5}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,8 \cdot 0,95} = 15 \text{ А}$$

$$i_{\Gamma M} = 5 \cdot 15 = 75 \text{ А}$$

$$I_{\pi} = 75 + (117,6 - 0,65 \cdot 15) = 182,85 \text{ А}$$

З урахуванням освітлення для цеху:

$$I_{\rho} = \frac{749,072}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1081,5 \text{ А} \quad i_{\text{НОМ}} = 54 \text{ А} \quad i_{\Gamma M} = 270 \text{ А}$$

$$I_{\pi} = 270 + (1081,5 - 0,39 \cdot 54) = 1330,44 \text{ А}$$

Таблиця 9.2

№ п/п	Найменування вузлів живлення й груп електроспоживачів	Кількість електроспоживачів	Установлена потужність, приведена до ПВ = 100%		$m = P_{\text{нmax}} / P_{\text{нmin}}$	Коефіцієнт використання, $K_{\text{в}}$	$\frac{\cos \varphi}{\text{tg} \varphi}$	Середнє навантаження за максимально завантаженою зміну		Ефективне число ЕП, $n_{\text{е}}$	Коефіцієнт максимуму, $K_{\text{м}}$	Максимальне навантаження			Розрахункові струми $I_{\text{р}}/I_{\text{п}}, \text{А}$
			Одного ЕП (найменшого/найбільшого) $P_{\text{н}}, \text{кВт}$	Загальна $P_{\text{н}}, \text{кВт}$				$P_{\text{см}} = K_{\text{в}} \cdot P_{\text{м}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \text{tg} \varphi, \text{квар}$			$P_{\text{м}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}}$ при $n_{\text{е}} > 10$ $Q_{\text{м}} = 1,1 Q_{\text{см}}, n_{\text{е}} \leq 10$	$S_{\text{м}}, \text{кВА}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Споживачі групи А:</b>															
1	Металооброблювальні верстати	134	1/29	501,7	29	0,17	$\frac{0,65}{1,169}$	85,29	99,7						
2	Кран-балки, крани, електричні талі	8	2,63/30	61,9	11,4	0,1	$\frac{0,5}{1,732}$	6,19	10,7						
3	Електроерозійні, електроіскрові прошивальні верстати	8	2,5/30	105	12	0,35	$\frac{0,6}{1,333}$	36,75	4,9						
4	Електропечі	30	1,7/37	688,6	21,8	0,5	$\frac{0,95}{0,619}$	344,35	213,2						
	<b>Разом</b>	180	1/37	1356,6	>3	0,35	-	472,58	372,6	73	1,1	519,8	372,6	639,6	$\frac{923}{1188}$
<b>Споживачі групи Б:</b>															
5	Вентиляція	17	1,5/7,5	82,1	5	0,65	$\frac{0,8}{0,75}$	53	61,575	17	1	53	62	81	$\frac{117,6}{182,85}$
	Разом по цеху без урахування освітлення	197	1/37	1438,7	-	0,37	-	526	434	-	-	573	434	719	-
	Освітлювальне навантаження	-	-	43,8	-	-	0,85	-	-	-	-	37	-	-	-
	<b>Разом по цеху</b>	197	-	1482,5	-	-	-	-	-	-	-	610	434	749	$\frac{1081}{1330}$

## 9.2. Розподіл електроприймачів цеху по пунктах живлення

Електропостачання цеху здійснюємо від КТП-9, що розташовується в приміщенні інструментального цеху. В КТП-9, на виході силових трансформаторів установлюються шафи типу ШП з викатними автоматичними вимикачами типу «Електрон».

Від КТП навантаження розподіляється за двома магістральними шинопроводами ШМА-1 і ШМА-2. Від ШМА-1 електроенергію передаємо через рубильники типу ЯБПВУ, далі по кабельним лініям розподіляємо її на розподільчі шафи, два розподільчі пункти ПР-1 та ПР-2. Дальше від ПР, через ШР, кабелями заживлюємо електроспоживачі цеху.

Від шинопроводу ШМА-2 електроспоживачі заживлюються кабелями через розподільчі шафи (ШР). Схема розподільчої мережі інструментального цеху зображена на графічному кресленні кваліфікаційної роботи.

Усі електроспоживачі цеху розподілені на тридцять чотири розподільчі шафи (ШР). Розподілення електроспоживачів по ШР наведено в табл. 9.3 і показано на плані цеху. Відповідно до розрахунків наведених у табл. 9.2, вибираємо ввідний автоматичний вимикач типу «Електрон» Э16ВМ-1600 А.

$$I_{\text{ном розщ.}} = 1600 \text{ А} > I_{\rho} = 1330 \text{ А} .$$

$$I_{\text{пер.}} = 1600 \text{ А}; I_{\text{кз.}} = 4000 \text{ А} > 1,5 \cdot I_{\rho} = 1995,66 \text{ А}$$

Враховуючи, що в приміщенні інструментального цеху вантажі переміщуються кранами, то для полегшення та безпечного проведення робіт кранами, електроспоживачі живляться проводами та кабелями, прокладеними в сталевих електрозварних трубах в підлозі, а також прокладаємо кабелі від ШТ в кабельних каналах.

ШМА розміщений на висоті 3 м, а отже встановлюємо захисну апаратуру у зручному та доступному місці. У коробках освітлення ШМА встановлюємо роз'єднувач, а на ввіді у ШР – рубильник з запобіжниками. В якості розподільчої шафи використовуємо шафу ШР-11-73.

Розподілення електроспоживачів на ШР наведено в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

## Розподілення електроспоживачів на ШП цеху

Номер ШП	Номер електроспоживача за планом цеху	Номер ШП	Номер електроспоживача за планом цеху
1	2	3	4
ШП-1	28,31,32,38,50,104	ШП-19	94,108,177
ШП-2	15,20,21,88,89	ШП-20	29,30,34,164,165,166
ШП-3	33,56,119	ШП-21	37,39,40,58,128,243
ШП-4	6,34,42,135	ШП-22	86,87,173,174,224
ШП-5	13,14,79,80,229	ШП-23	95,96,107,111,245
ШП-6	35,52,53,120,121,133	ШП-24	112,113,118,193,199
ШП-7	54,55,62,70,99	ШП-25	57,59,124,225
ШП-8	81,82,125,195,196,205	ШП-26	4,5,145,146,223
ШП-9	142,143,144	ШП-27	139,140,202,178
ШП-10	8,9,11,12,134,232	ШП-28	60,97,153,179,209
ШП-11	81,82,83,89	ШП-29	1,2,3,10,163
ШП-12	84,85,98,129	ШП-30	46,47,49,168,169,175,176,210
ШП – 13	7,101,102,231	ШП-31	170,171,181,182,183,218,221
ШП-14	103,106,130,132,136	ШП-32	145,150,151,152,185,219
ШП-15	45,131,137,138,139	ШП-33	153,191,192,193,209,210,220
ШП-16	16,17,18,19,234,235	ШП-34	Вентиляційна система
ШП-17	25,26,27,236,237	ШП-35	105,123,197,223,224
ШП-18	91,92,93,114,115,116,117		

Для того, щоб вибрати захисні апарати та кабелі від ШМА до ШП, за методом упорядкованих діаграм визначаємо навантаження для кожного ШП окремо. Отримані при цьому результати наведені у табл. 9.4.

Таблиця 9.4

Зведена таблиця розрахунку навантаження цеху

Найменування вузла живлення й групи електроспоживачів	Кількість електроспоживачів, п	Установлена потужність, приведена до ПВ=100%		$m = P_{\text{пmax}} / P_{\text{пmin}}$	Коефіцієнт використання, $K_{\text{в}}$	$\frac{\cos \varphi}{\text{tg} \varphi}$	Середнє навантаження за максимально навантаженою зміну		Ефективне число ЕП, $n_e$	Коефіцієнт максимуму, $K_{\text{м}}$	Максимальне навантаження			Розрахунковий струм $I_{\text{р}}/I_{\text{пр}}, \text{А}$
		Одного ЕП (найменшого/найбільшого) $P_{\text{п}}, \text{кВт}$	Загальна $P_{\text{п}}, \text{кВт}$				$P_{\text{см}} = K_{\text{в}} \cdot P_{\text{м}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \text{tg} \varphi, \text{квар}$			$P_{\text{м}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}}$ при $n_e \geq 10$ $Q_{\text{м}} = 1,1 \cdot Q_{\text{см}}, n_e \leq 10$	$S_{\text{м}}, \text{кВА}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Розподільчий шкаф ШР-1</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	6	1/2,9	10,3	> 3	0,14	$\frac{0,6}{1,33}$	1,44	1,9	6	2,6	3,8	2,1	4,4	$\frac{6}{37}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-2</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	5	3,6/5,5	21,8	> 3	0,14	$\frac{0,6}{1,33}$	3,052	4,1	5	2,9	8,8	4,5	9,8	$\frac{14}{86}$
РАЗОМ на рубильник 1 (ЯБПВУ)	11	1/5,5	32,1	-	0,2	-	4,49	5,98	-	-	12,6	6,6	14,2	$\frac{21}{92}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-3</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	2	2,9/7,2	10,1	-	0,14	$\frac{0,6}{1,33}$	1,41	1,88	-	-	-	-	-	-
Кран-балка ПВ=100%	1	30,5	30,5	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	1,83	2,43	-	-	-	-	-	-
РАЗОМ на ШР-3	3	2,9/30,5	40,6	> 3	0,08	-	3,24	4,32	3	3,6	11,8	4,7	12,7	$\frac{18}{413}$

Продовження табл. 9.4

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Розподільчий шкаф ШР-4</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	3	1,7/1,8	5,3	-	0,14	<u>0,5</u> 1,73	0,742	1,28	-	-	-	-	-	-
Електроерозійний прошивальний верстат	1	10	10	-	0,2	<u>0,7</u> 1,02	2	2,04	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-4</b>	4	1,7/10	15,3	> 3	0,18	-	2,742	3,32	4	2,8	7,79	3,7	8,6	<u>12</u> 49
<b>Розподільчий шкаф ШР-5</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	1,75/9,8	16,9	> 3	0,14	<u>0,5</u> 1,73	2,36	4,09	-	2,9	6,8	4,5	8,1	<u>12</u> 108
<b>Розподільчий шкаф ШР-7</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	1,8/9,8	27,7	-	0,14	<u>0,5</u> 1,73	3,87	6,7	-	-	-	-	-	-
<b>Розподільчий шкаф ШР-8</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	3,4/4,8	19,8	-	0,14	<u>0,5</u> 1,73	2,76	4,8	-	-	-	-	-	-
Електрична таль	1	3	3	-	0,06	<u>0,6</u> 1,33	0,18	0,31	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-8</b>	6	3/4,8	21,8	< 3	0,14	-	2,949	5,1	6	2,6	7,79	5,61	9,59	<u>14</u> 138
<b>РАЗОМ на ШР-7 та ШР-8</b>	11	1,8/9,8	49,5	> 3	0,14	-	6,872	11,8	10	2,1	14,43	11,81	18,65	<u>27</u> 151
<b>Розподільчий шкаф ШР-6</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	6	2,9/17	32,9	-	0,14	<u>0,5</u> 1,73	4,6	7,96	-	-	-	-	-	-

Продовження табл. 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>РАЗОМ на ШР-6, ШР-7 та ШР-8</b>	17	1,8/17	82,4	> 3	0,14	-	11,47	19,77	5	2,8	32,9	19,7	38,4	$\frac{56}{282}$
<b>РАЗОМ на ПР-1</b>	29	1,7/30,5	155,2	> 3	0,13	-	19,81	31,45	24	1,5	30,7	31,4	43,9	$\frac{65}{456}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-9</b>														
<b>Група А: Електроіскрові прошивальні верстати</b>	3	2,5/10	15	> 3	0,2	$\frac{0,7}{1,02}$	3	3,1	3	2,8	8,6	3,36	9,2	$\frac{30}{93}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-10</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	6	1,75/17	25,37	> 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,55	6,14	3	3,5	12,5	6,7	14,3	$\frac{21}{247}$
<b>РАЗОМ на рубильник 3 (ЯБПВУ)</b>	9	1,75/17	40,37	> 3	0,16	-	6,55	9,2	4	3,1	20,37	10,12	22,7	$\frac{33}{259}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-11</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	4	4,8/5,5	19,9	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,78	4,8	4	3,1	8,66	5,3	10,15	-
<b>Розподільчий шкаф ШР-12</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	4	4,8/6,1	21,2	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,96	5,13	4	3,1	9,2	5,64	10,82	$\frac{16}{112}$
<b>РАЗОМ на рубильник 4 (ЯБПВУ)</b>	8	4,8/6,1	41,1	< 3	0,14	-	5,75	9,95	8	2,3	13,29	10,9	17,22	$\frac{25}{121}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-34</b>														
<b>Група Б-Б: Вентиляційна система</b>	17	1,3/7,5	80,6	> 3	0,65	$\frac{0,8}{0,75}$	52,9	39,29	17	1	52,4	39,29	65,48	$\frac{95}{187}$

Продовження табл. 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
РАЗОМ на рубильник Д (ЯБПУ)	34	1,75/7,5	162,07	> 3	0,4	-	65,236	58,45	34	1,17	76,32	58,45	96,13	$\frac{139}{234}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-13</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	4	4,6/29	42,8	> 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	5,99	10,36	4	3,1	18,65	11,4	21,86	$\frac{31,6}{508,1}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-14</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	5	4,6/8,4	30,6	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	4,28	7,41	5	2,8	12,3	8,15	14,7	$\frac{21}{150}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-15</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	5	4,6/8,4	27,2	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,8	6,58	5	2,8	10,92	7,24	13,11	$\frac{19}{148}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-16</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	6	3,6/4,6	23,6	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,3	5,71	6	2,6	8,72	6,28	10,75	-
<b>Розподільчий шкаф ШР-17</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	6	3,6/4,6	24,8	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,47	6	6	2,6	9,16	6,6	11,3	$\frac{16}{70}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-18</b>														
Група А: Металооброблювальні верстати	7	4,6/15,1	74,2	> 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	10,39	17,97	5	2,8	29,8	19,7	35,7	$\frac{52}{25}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-19</b>														
Підвісний кран	1	5,7	5,7	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,43	0,45	-	-	-	-	-	-

Продовження табл. 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	2	4,6	9,2	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	1,28	2,23	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-19</b>	3	4,6/5,7	14,9	< 3	0,11	-	1,63	2,68	3	3,6	5,9	2,95	6,64	$\frac{10}{94}$
<b>РАЗОМ на ПР-2</b>	36	3,6/29	238,1	> 3	0,14	-	34,16	56,74	26	1,5	52,96	56,7	75	$\frac{108}{208}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-20</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	6	1,8/4,7	18,8	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,63	4,55	6	2,6	6,9	5	8,6	$\frac{12}{67}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-21</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	6	2,9/8,25	32,45	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	4,54	7,85	6	2,6	12,07	8,6	15,4	$\frac{22}{121}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-22</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	3/4,5	1,56	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,3	4	5	2,8	6,6	4,4	7,9	$\frac{12}{65}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-23</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	4,5/9,8	43,7	< 3	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	6,11	10,58	5	2,8	17,55	11,6	21	$\frac{30}{176}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-24</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	5	9,8	49	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	6,8	11,86	5	2,8	19,7	13	23,6	$\frac{34,1}{180,1}$
<b>РАЗОМ на ШМА-1</b>	126	1,7/30,5	715,82	> 3	0,2	-	141,7	185,5	47	1,3	177	185,5	256,5	$\frac{370}{758}$

Продовження табл. 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Розподільчий шкаф ШР-25</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	3	1,8/12	16,7	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,33	4,04	-	-	-	-	-	-
Електрична таль	1	2,63	2,63	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,15	0,27	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-25</b>	4	1,8/12	19,3	> 3	0,13	-	2,49	4,31	3	3,4	8,56	4,8	9,7	$\frac{14}{195}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-26</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	2	2,9	5,8	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	0,81	1,405	-	-	-	-	-	-
<b>Електроерозійний прошивальний верстат</b>	2	10	20	-	0,2	$\frac{0,7}{1,02}$	4	4	-	-	-	-	-	-
Кран підвісний	1	5,7	5,7	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,34	0,45	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-26</b>	5	2,9/10	31,5	> 3	0,15	-	4,81	5,48	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-25 та ШР-26</b>	9	1,8/12	50,83	> 3	0,14	-	7,3	9,8	6	2,6	19,29	10,78	22,1	$\frac{32}{213}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-27</b>														
<b>Група А: Металооброблювальні верстати</b>	1	5,7	5,7	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	0,79	1,38	-	-	-	-	-	-
Прошивальні верстати	2	30	60	-	0,2	$\frac{0,6}{1,33}$	12	15,9	-	-	-	-	-	-
Підвісний кран	1	5,7	5,7	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,34	0,45	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-27</b>	4	5,7 / 30	71,4	> 3	0,18	-	13,1	17,8	3	2,84	38,1	19,6	42,8	$\frac{62}{447}$

Продовження табл. 9.45

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>РАЗОМ</b> на рубильник 5 (ЯБПУ)	13	1,8/30	122,23	> 3	0,19	-	22,94	27,6	7	2,1	48,18	27,6	55,5	$\frac{80}{465}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-28</b>														
<b>Група А:</b> Металооброблювальні верстати	2	13,9	27,8	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,89	6,73	-	-	-	-	-	-
Електрична піч опору	2	34	68	-	0,5	$\frac{0,85}{0,6}$	34	20,4	-	-	-	-	-	-
Підвісний кран	1	5,7	5,7	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,342	0,455	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ</b> на ШР-28	5	5,7/34	101,5	> 3	0,38	-	38,23	27,59	5	1,6	63,47	30,3	70,4	$\frac{102}{242}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-29</b>														
<b>Група А:</b> Металооброблювальні верстати	4	5,3	21,2	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	2,96	5,14	-	-	-	-	-	-
Електрична таль	1	2,63	2,63	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,16	0,27	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ</b> на ШР-29	5	2,63/5,3	23,8	< 3	0,13	-	3,12	5,34	5	2,8	8,97	5,9	10,7	$\frac{16}{93}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-35</b>														
<b>Група А:</b> Металооброблювальні верстати	3	5,1/12	26,9	-	0,14	$\frac{0,5}{1,73}$	3,76	6,52	-	-	-	-	-	-
Підвісний кран	1	5,7	5,7	-	0,06	$\frac{0,6}{1,33}$	0,34	0,46	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ</b> на ШР-35	4	5,1/12	32,6	< 3	0,13	-	4,1	6,9	4	3,1	12,8	7,7	14,9	$\frac{22}{203}$
<b>РАЗОМ</b> на ШР-29 та ШР-35	9	2,63/12	56,4	> 3	0,13	-	7,23	12,32	8	2,3	16,7	8,4	18,7	$\frac{27}{208}$

Закінчення табл. 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>РАЗОМ</b> на рубильник 6 (ЯБПУ)	14	2,63/34	157,9	> 3	0,3	-	45,46	39,9	9	1,65	75	39,9	84,97	$\frac{123}{267}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-30</b>														
<b>Група А:</b> Плавильні печі	5	1,7	8,5	-	0,5	$\frac{0,8}{0,75}$	4,25	3,19	-	-	-	-	-	-
Електрична піч опору	3	34/37	108	-	0,7	$\frac{0,95}{0,33}$	75,6	24,9	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-30</b>	8	1,7/37	116,5	> 3	0,68	-	79,8	28,1	4	1,2	103	28,9	106,9	$\frac{150}{313}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-31</b>														
<b>Група А:</b> Плавильні печі	5	1,7	8,5	-	0,5	$\frac{0,8}{0,75}$	4,3	3,2	-	-	-	-	-	-
Електрична піч опору	2	34	68	-	0,7	$\frac{0,95}{0,33}$	47,6	15,7	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-31</b>	7	1,7/34	76,5	> 3	0,68	-	51,8	18,8	5	1,3	65,3	20,7	68,6	$\frac{99}{297}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-32</b>														
<b>Група А:</b> Плавильні печі	1	1,7	1,7	-	0,5	$\frac{0,8}{0,75}$	0,85	0,63	-	-	-	-	-	-
Електрична піч опору	6	34/37	207	-	0,7	$\frac{0,95}{0,33}$	145	47,8	-	-	-	-	-	-
<b>РАЗОМ на ШР-32</b>	7	1,7/37	208,7	> 3	0,69	-	145,8	48,5	4	1,3	188	53	195,4	$\frac{282}{846}$
<b>Розподільчий шкаф ШР-33</b>														
<b>Група А-А:</b> Електрична піч опору	7	34/37	247	< 3	0,7	$\frac{0,95}{0,33}$	172,9	57,1	7	1,2	209	62,8	-	$\frac{315}{946}$
<b>РАЗОМ на ШМА-2</b>	56	1,7/37	757,7	> 3	0,42	-	-	-	41	1,15	368	211	424	$\frac{613}{988}$
<b>РАЗОМ на ЦЕХ</b>	182	1,7/37	1472,5	> 3	0,3	-	461,6	397	80	1,1	512	397	648	$\frac{936}{1317}$

За результатами розрахунків згідно табл. 9.4 вибираємо ШР та провідники від ШМА і ПР до ШР.

Кабель вибираємо за умовою:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_M}{k_{\text{пр}}}, \quad (9.8)$$

де  $I_M$  – розрахунковий струм ШР;

$k_{\text{пр}}$  – коефіцієнт, що враховує поправку на прокладання провідників.

Запобіжники у рубильниках вибираємо за умовою:

$$I_{\text{н.вст}} \geq \frac{I_{\text{пik}}}{2,5}, \quad (9.9)$$

де  $I_{\text{пik}} = i_{\text{пmax}} + (I_p - K_B \cdot i_{\text{нmax}})$  – піковий струм;  $i_{\text{пmax}}$  та  $i_{\text{нmax}}$  – найбільше значення пускового і номінального струму електродвигуна у групі, визначається як:

$$I_{\text{нmax}} = \frac{P_{\text{нmax}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad i_{\text{пmax}} = 7 \cdot i_{\text{нmax}}; \text{ для плавильних і електричних печей опору}$$

$i_{\text{пmax}} = i_{\text{нmax}}$ . Отримані при цьому результати заносимо у табл. 9.4, колонка 15.

Вибрані кабелі, запобіжники та рубильники наведені в табл. 9.5. Ми не перевіряємо термічну стійкість кабелів, оскільки час спрацьовування запобіжника дуже короткий, і за цей час кабель не встигне нагрітися до критичної температури. Для заживлення ПР та ШР використаємо кабель типу НРГ з умовою маслостійкою оболонкою, яка не розповсюджує горіння.

Таблиця 9.5

Ділянка мережі	$S_m$ , кВ·А	$I_m$ , А	Дов- жи- на лінії, L, м	$I_{\text{п}}$ , А	Переріз кабеля НРГ, число жил x переріз	$I_{\text{доп}}$ , А	Тип запобіж- ника (авто- мата)	$I_{\text{п}}$ плав- кої вста- вки, А
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШР-1–ШМА-I	4,34	6	16,4	37	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	40
ШР-2–ШМА-I	13,2	19	16,6	95	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	40
ШР-3–ПР-1	12,7	18	18,8	143	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	60
ШР-4–ПР-1	8,6	12	7	49	3x4+1x2,5	41	ПНП-60	25
ШР-5–ПР-1	8,15	12	5,3	108	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	40

Продовження табл. 9.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШР-7,ШР-8–ШР-6	18,65	27	4,4	151	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	60
ШР-6–ПР-1	38,42	56	14	282	3x10+1x6	80	ПН-2-250	120
ПР-1–ШМА-I	43,96	65	10,2	456	3x10+1x6	80	ПН-2-250	200
ШР-9–3ЯБПВУ	19,22	30	2,8	93	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	80
ШР-10–3ЯБПВУ	14,25	21	3	247	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	100
3ЯБПВ –ДЯБПВУ	22,75	38	19	258	3x6+1x4	50	ПН-2-100	100
ШР-12 – ШР-11	10,82	16	5,4	112	3x4+1x2,5	41	-	-
ШР-11 – Д ЯБПВУ	17,22	25	12	121	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	50
ШР-34 – Д ЯБПВУ	65,49	95	7,6	187	3x25+1x16	140	ПН-2-250	80
Д ЯБПВУ -ШМА-I	96,14	139	3,5	334	3x35+1x25	145	ПН-2-250	200
ШР-13 – ПР-2	21,83	32	26	508	3x6+1x4	50	ПН-2-250	120
ШР-14–ПР-2	14,76	21	20	150	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	60
ШР-15–ПР-2	13,13	19	11,4	148	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	60
ШР-16–ПР-2	10,75	16	7	69	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	30
ШР-17–ПР-2	11,3	16	3	70	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	30
ШР-18–ПР-2	35,77	52	7	247	3x10+1x6	80	ПН-2-100	100
ШР-19–ПР-2	6,64	10	13	94	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	40
ПР-2–ШМА-I	74,9	108	16	208	3x25+1x16	140	ПН-2-250	80
ШР-20–ШМА-I	8,57	12	4	67	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	30
ШР-21–ШМА-I	15,38	22	7	121	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	60
ШР-22–ШМА-I	7,96	12	4,6	65	3x4+1x2,5	41	ПН-2-100	30
ШР-23–ШМА-I	21,07	30	3	176	3x4+1x2,5	41	ПН-2-250	80
ШР-24–ШМА-I	23,62	34	2	180	3x6+1x4	50	ПН-2-250	80
ШМА-I	256,47	370	60	758	ШМА3(40x4)	625	Э10 МБ	1200
ШР-25–ШР-26	9,79	14	6	195	3x4+1x2,5	41	-	-
ШР-26– 5ЯБПВУ	22,102	32	2	213	3x6+1x4	50	-	-

Закінчення табл. 9.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШР-27–5ЯБПВУ	42,8	62	6	447	3x10+1x6	80	-	-
5ЯБПВУ–ШМА-П	55,26	80	7	465	3x16+1x10	100	ПН-2-250	200
ШР-28–6 ЯБПВУ	70,4	102	7	242	3x25+1x16	140	-	-
ШР-29–ШР-35	10,73	16	6	93	3x4+1x2,5	41	-	-
ШР-35–6ЯБПВУ	18,72	27	12	28	3x4+1x2,5	41	-	-
6ЯБПВУ–ШМА-П	84,97	123	6	267	3x25+1x16	140	ПН-2-250	100
ШР-30–ШМА-П	72,3	104	2	313	3x25+1x16	140	ПН-2-250	120
ШР-31–ШМА-П	68,56	99	3	297	3x25+1x16	140	ПН-2-250	120
ШР-32–ШМА-П	195,43	282	4	846	3x120+1x70	385	ПН-2-400	350
ШР-33–ШМА-П	218,42	315	9	946	3x150+1x70	440	ПН-2-400	350
ШМА-П	424,4	613	45,2	988	ШМА3x(40x4)	625	Э10 МБ	1200
ЩО-1–ТП	14,6	21	13	-	3x2,5+1x1,5	30	А3710 Б	40
ЩО-2–КТП	14,6	21	14,5	-	3x2,5+1x1,5	30	А3710 Б	40
ЩО-3– ТП	14,6	21	31	-	3x2,5+1x1,5	30	А3710 Б	40
ЩО-4–КТП	14,6	21	39	-	3x2,5+1x1,5	30	А3710 Б	40

Типи розподільчих пристроїв:

ШР – ШРС-1-21 – розподільчий шкаф;

ЯБПВУ 4 – рубильник;

ПР – БПВ 2 – розподільчий пункт.

### 9.3. Вибір силової розподільчої мережі та апаратів керування й захисту

Детально розглянемо вибір пристроїв захисту та керування індивідуальними електроспоживачами на прикладі одного ШР–ШР-6. Результати вибору показано у табл. 9.6. Для інших ШР виберемо мережу розподілу електроенергії та подамо результати у вигляді табл. 9.7. Індивідуальні електроспоживачі заживлюються від ШР проводами, прокладеними в сталевих трубах у підлозі. Для живлення

споживачів вибираємо провід марки АПВ з алюмінієвими жилами. Застосовується в сухих і вологих приміщеннях, в пожежонебезпечних зонах усіх класів та складських пожежонебезпечних приміщеннях.

Вибираємо провідники від ШР до електроспоживачів за умовою:

$$I_{доп} = \frac{I_M}{k_{пр}},$$

де  $k_{пр}$  – коефіцієнт, що враховує поправку на кількість проводів, прокладених в одній трубі.

Переріз провідників цехової мережі вибирають за розрахунковим струмом навантаження з таким розрахунком, щоб при струмах навантаження, що відповідають тривалому режиму експлуатації та нормованих для них умов температури навколишнього середовища, вони не перегрівалися понад допустимої межі.

Усі електроспоживачі цеху захищені запобіжниками (час спрацьовування  $t_{ср}=0,005$  с), перевірку проводів на термічну стійкість до струмів КЗ не здійснюємо.

Таблиця 9.6

## Силова розподільча мережа та апарати захисту і керування ШР-6

Лінія, що відходить від ШР-6	Запобіжник		Проводка до пускача			Магнітний пускач та відгалуження до електродвигуна				Електроспоживач		
	Тип	$\frac{I_{н.ар}}{I_{н.вст}}, А$	Марка переріз, мм <sup>2</sup>	Спосіб прокладання	L, м	Тип магнітного пускача	I <sub>н</sub> , А	Марка та переріз провoda	Спосіб прокладання	№ на плані цеху	Виробничий механізм	P <sub>н</sub> , кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	НПН	$\frac{15}{15}$	АПВ-500 3 (1x2,5)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	4,6	П-61	10	АПВ 3(1x2,5)	Металорукав, станина	35	Плоскошліфувальний верстат	2,9
2	НПН	$\frac{15}{15}$	АПВ-500 3 (1x2,5)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	3,5	П-61	10	АПВ 3(1x2,5)	Металорукав, станина	52	Плоскошліфувальний верстат	2,9
3	НПН	$\frac{15}{15}$	АПВ-500 3 (1x2,5)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	2,75	П-61	10	АПВ 3(1x2,5)	Металорукав, станина	53	Плоскошліфувальний верстат	2,9
4	ПН-2	$\frac{15}{15}$	АПВ 3(1x2,5)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	2	ПМ-711-А	25	АПВ 3(1x2,5)	Металорукав, станина	120	Координатний розточувальний верстат	7,2
5	ПН-2	$\frac{100}{50}$	АПВ 3(1x2,5)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	1,5	ПМ-711-А	25	АПВ 3(1x2,5)	Металорукав, станина	121	Координатний розточувальний верстат	7,2
6	ПН-2	$\frac{100}{50}$	АПВ 3(1x4)	Підлога, труба ø ¾ дюйма	1	ПА - 300	40	АПВ 3(1x2,5)	-	133	Профільошліфувальний верстат з пантографом	17

Таблиця 9.7

## Вибір силової та розподільчої мережі цеху і захисної апаратури

№ та тип ШР	№ ЕП на плані цеху	I <sub>н</sub> , А	I <sub>п</sub> , А	Тип запобіжника	I <sub>н.п.л.вст.</sub> , А	Ø труби, дюйм	Параметри проводу АПВ-500, кількість жил х (переріз)
1	2	3	4	5	6	7	8
ШР-1 ШРС-1-21	28,31,32	3,7	22	НПН-15	10	1/2	3х(1х2,5)
	50	5,8	32	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	104	7,7	54	НПН-60	25	3/4	3х(1х4)
ШР-2 ШРС-1-21	12	3,7	22	НПН-15	10	1/2	3х(1х2,5)
	20,21	7,7	54	ПН-2-100	30	3/4	3х(1х4)
	88,89	12	84	ПН-2-100	40	3/4	3х(1х4)
ШР-3 ШРС-1-21	33	5,8	32	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	56	5,7	400	ПН-2-250	150	1	3х(1х10)
	119	14,5	102	ПН-2-100	40	1/2	3х(1х2,5)
ШР-4 ШРС-1-21	34	5,8	38	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	42	3,7	32	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	119	20,6	62	ПН-2-100	30	3/4	3х(1х4)
ШР-5 ШРС-1-21	13,14	3,9	20	НПН-15	10	1/2	3х(1х2,5)
	79,80	5,8	38	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	229	19,8	149	ПН-2-100	60	3/4	3х(1х4)
ШР-6 ШРС-1-21	35,52,53	5,8	38	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	120,121	5,8	38	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	133	33	231	ПН-2-100	100	1	3х(1х10)
ШР-7 ШРС-1-21	54,99	5,8	38	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	62,70	19,5	117	ПН-2-100	50	3/4	3х(1х4)
	55	9,4	76	ПН-2-100	40	1/2	3х(1х2,5)
ШР-8 ШРС-1-21	81,82,125,126, 196	7,7	54	ПН-2-100	30	3/4	3х(1х4)
	205	6,1	34	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
ШР-9 ШРС-1-21	142,143	5,2	16	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	144	14,6	69	ПН-2-100	80	3/4	3х(1х4)
ШР-10 ШРС-1-21	232	33	231	ПН-2-100	100	3/4	3х(1х10)
	134	3,5	25	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
	8,9,11,12	4,2	29	НПН-15	15	1/2	3х(1х2,5)
ШР-11 ШРС-1-21	181, 182, 183	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3х(1х2,5)
	91	9,1	59	ПН-2-100	30	1/2	3х(1х2,5)
ШР-13 ШРС-1-21	101,102,231	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3х(1х2,5)
	7	5,7	400	ПН-2-250	150	1	3х(1х16)

Продовження табл. 9.7

1	2	3	4	5	6	7	8
ШР-12 ШРС-1-21	129	12,49	94	ПН-2-100	40	3/4	3x(1x4)
	84,85	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	98	12,7	75	ПН-2-100	40	3/4	3x(1x4)
ШР-14 ШРС-1-21	103,106,136	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	130,132	18,8	132	ПН-2-100	50	3/4	3x(1x4)
ШР-15 ШРС-1-21	131,138,139	9,1	55	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	132	17,1	128	ПН-2-100	50	3/4	3x(1x4)
	45	11,3	57	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
ШР-16 ШРС-1-21	234,235	9,1	55	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	16,17,18,19	7,7	54	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
ШР-17 ШРС-1-21	236,237	9,1	55	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	26,27,51	8	56	НПН-60 м	25	1/2	3x(1x2,5)
	25	7,7	54	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
ШР-18 ШРС-1-21	91,92,93	9,1	55	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	114,115,116,117	28,5	200	ПН-2-100	80	3/4	3x(1x6)
ШР-19 ШРС-1-21	94,108	9,1	55	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	177	13	78	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
ШР-20 ШРС-1-21	29,166	6,8	34	НПН-15	15	1/2	3x(1x2,5)
	30,34	4,2	24	НПН-15	10	1/2	3x(1x2,5)
	164,165	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
ШР-21 ШРС-1-21	37	11	77	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	39	11,3	57	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	40	17,1	128	ПН-2-100	50	3/4	3x(1x4)
	58	6,6	46	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	128	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	243	11,3	57	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
ШР-22 ШРС-1-21	86,87,173,174	6,1	43	НПН-60 м	20	1/2	3x(1x2,5)
	224	9,4	96	ПН-2-100	40	1/2	3x(1x2,5)
ШР-23 ШРС-1-21	95,96,107,111	19,5	117	ПН-2-100	50	3/4	3x(1x4)
	245	9,4	96	ПН-2-100	40	1/2	3x(1x2,5)
ШР-24 ШРС-1-21	112,113,118, 193,199	19,5	117	ПН-2-100	50	3/4	3x(1x4)
ШР-25 ШРС-1-21	57	5,8	38	НПН-60 м	15	1/2	3x(1x2,5)
	59	6,6	33	НПН-60 м	15	1/2	3x(1x2,5)
	124	24	184	ПН-2-100	80	3/4	3x(1x6)

Продовження табл. 9.7

1	2	3	4	5	6	7	8
	225	6,14	37	НПН-60 м	15	1/2	3x(1x2,5)
ШР-26 ШРС-1-21	4,5	11	77	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	145,146	20,6	62	ПН-2-100	30	3/4	3x(1x4)
	223	5,2	16	НПН-15	15	1/2	3x(1x2,5)
ШР-27 ШРС-1-21	139	10,1	71	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	202	11	77	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	178	12,1	79	ПН-2-100	40	3/4	3x(1x4)
	140	61,9	186	ПН-2-100	80	1	3x(1x25)
ШР-28 ШРС-1-21	60,97	27,4	192	ПН-2-100	80	3/4	3x(1x4)
	179	12,1	79	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	153,209	70,1	210	ПН-2-100	100	1	3x(1x25)
ШР-29 ШРС-1-21	1, 2, 3, 10	11	77	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	163	6,1	37	НПН-60 м	15	1/2	3x(1x2,5)
ШР-30 ШРС-1-21	46,47,49,168, 169	3,5	11	НПН-15	6	1/2	3x(1x2,5)
	175,176	76,3	229	ПН-2-100	100	1	3x(1x25)
	210	70,1	210	ПН-2-100	80	1	3x(1x25)
ШР-31 ШРС-1-21	170,171,181, 182,183	2,4	11	НПН-15	6	1/2	3x(1x2,5)
	281,221	70,1	210	ПН-2-250	80	1	3x(1x25)
ШР-32 ШРС-1-21	184	3,5	11	НПН-15	6	1/2	3x(1x2,5)
	149,150,151, 152,219	70,1	210,3	ПН-2-250	80	1	3x(1x25)
	185	76,3	229	ПН-2-100	100	1	3x(1x25)
ШР-33 ШРС-1-21	153,209,210,220	70,1	210	ПН-2-250	80	1	3x(1x25)
	191,192,193	76,3	229	ПН-2-100	100	1	3x(1x25)
ШР-34 ШРС-1-21	Шість вентиляторів	14,5	102	ПН-2-100	40	3/4	3x(1x4)
	Чотири вентилятори	11	77	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	Два вентилятори	8,3	58	НПН-60 м	25	1/2	3x(1x2,5)
	Два вентилятори	2,68	1-	НПН-15	10	1/2	3x(1x2,5)
	Три вентилятори	3,5	25	НПН-15	10	1/2	3x(1x2,5)

1	2	3	4	5	6	7	8
ШР-35 ШРС-1-21	105	19,83	149	ПН-2-100	60	3/4	3x(1x4)
	224	13,6	75	ПН-2-100	30	1/2	3x(1x2,5)
	123	17,1	128	ПН-2-100	60	3/4	3x(1x4)
	197	4,2	24	НПН - 15	10	1/2	3x(1x2,5)
	223	5,2	16	НПН - 15	6	1/2	3x(1x2,5)

#### 9.4. Розрахунок струмів короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ

Розрахунок струмів короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ має такі особливості:

а) Потужність системи ( $S_c$ ) вважають нескінченною, тобто напруга на шинах підстанції постійна.

б) Враховують активні та індуктивні опори всіх елементів мережі до точки КЗ.

в) Розрахунок ведеться в іменованих одиницях.

г) Напругу приймають на 5% вище від номінального значення ( $U = 400$  В при  $U = 380$  В).

$$I_K = I'' = I_\infty = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma}, \text{ кА} \quad i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_K \quad (9.10)$$

де  $Z_\Sigma$  – сумарний опір до точки короткого замикання, проводимо до найбільш віддаленого електроприймача.

Обчислимо опори елементів схеми заміщення, що зображена на рис. 9.1.

Опір трансформатора ТМ - 1000/10.

$$r_T = \frac{\Delta P_{к.з.} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{12200 \cdot 400^2}{1000000^2} = 0,00195 \text{ Ом} \quad x_T = \frac{U_p \% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{н.тр}},$$

$$\text{де } U_p = \sqrt{U_{p\%}^2 - U_{a\%}^2}, \text{ звідки } U_{a\%} = \frac{\Delta P_{к.з.}}{S_{НОМ}^2} \cdot 100 = \frac{12,2 \cdot 100}{1000} = 1,22 \%$$

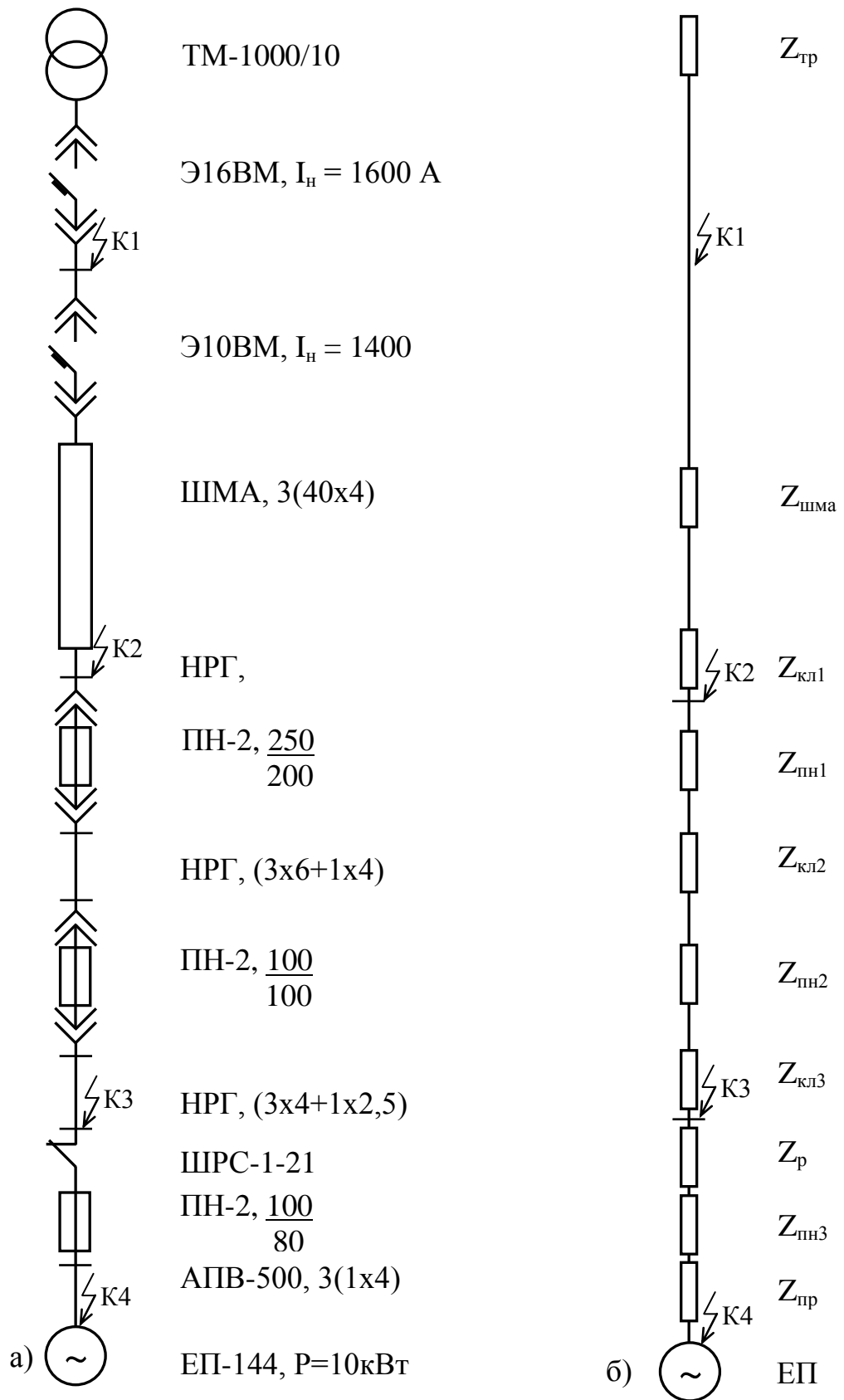


Рис 9.1. Розрахункова (а) і схема заміщення (б) електричної мережі до 1 кВ.

Лінія від ТП до найдалшого електроспоживача

$$U_p = \sqrt{5,5^2 - 1,22^2} = 5,36 \%$$

$$x_T = \frac{5,36 \cdot 400^2}{100 \cdot 1000000} = 0,0086 \text{ Ом}$$

$$Z_T = \sqrt{r_T^2 + x_T^2} = \sqrt{0,00195^2 + 0,0086^2} = 0,00882 \text{ Ом.}$$

Оскільки номінальний струм повітряних вимикачів більше 1000 А, опір вимикачів і трансформаторів струму дуже малий, тому при розрахунку струмів короткого замикання  $Z_A$  і  $Z_{TA}$  не враховуються.

Обчислимо значення струму КЗ в точці  $K_1$ .

$$Z_\Sigma = Z_T = 0,00882 \text{ Ом}$$

$$I_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,00882} = 26,18 \text{ кА}$$

$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_K$  – ударний струм, де  $K_y$  при  $x/r=4,4$ ,  $K_y=1,5$ ,

$$i_y = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 26,18 = 55,54 \text{ кА.}$$

Струм КЗ в точці  $K_2$ .

$$Z_{\Sigma 2} = \sqrt{r_{\Sigma 2}^2 + x_{\Sigma 2}^2}, \text{ де } r_{\Sigma 2} = r_{\Sigma 1} + r_{шма} + r_{кл1}; \quad x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 1} + x_{шма} + x_{кл1},$$

$$r_{шма} = r_0 \cdot l_{шма} = 0,000222 \cdot 59 = 0,0131 \text{ Ом},$$

$$x_{шма} = x_0 \cdot l_{шма} = 0,000179 \cdot 59 = 0,0106 \text{ Ом},$$

$$r_{кл1} = r_0 \cdot l_{кл1} = 0,84 \cdot 0,002 = 0,0017 \text{ Ом},$$

$$x_{кл1} = x_0 \cdot l_{кл1} = 0,087 \cdot 0,002 = 0,0002 \text{ Ом},$$

$$r_{\Sigma 2} = 0,00195 + 0,0017 + 0,0131 = 0,0168 \text{ Ом},$$

$$x_{\Sigma 2} = 0,0086 + 0,0106 + 0,0002 = 0,0194 \text{ Ом},$$

$$Z_{\Sigma 2} = \sqrt{0,0168^2 + 0,0194^2} = 0,0257 \text{ Ом},$$

$$I_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,0257} = 8,999 \text{ кА}$$

$$x/r=1,79, \quad K_y=1,18, \quad i_y = 1,18 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,999 = 15,017 \text{ кА.}$$

Струм КЗ в точці К<sub>3</sub>.

$$Z_{\Sigma 3} = \sqrt{r_{\Sigma 3}^2 + x_{\Sigma 3}^2}, \quad \text{де} \quad r_{\Sigma 3} = r_{\Sigma 2} + r_{\text{ПН1}} + r_{\text{КЛ2}} + r_{\text{ПН2}} + r_{\text{КЛ3}}; \quad X_{\Sigma 3} = X_{\Sigma 2} + X_{\text{КЛ2}} + X_{\text{КЛ3}}.$$

Опори запобіжників ПН-2-250,  $I_{\text{н.вст.}} = 120\text{А}$  та ПН-2-100,  $I_{\text{н.вст.}} = 100\text{А}$ ,

$$r_{\text{ПН1}} = 0,00062 \text{ Ом}, \quad r_{\text{ПН2}} = 0,00068 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{КЛ2}} = r_0 \cdot l_{\text{КЛ2}} = 7,9 \cdot 0,019 = 0,15 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{КЛ2}} = x_0 \cdot l_{\text{КЛ2}} = 0,1 \cdot 0,019 = 0,0019 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{КЛ3}} = r_0 \cdot l_{\text{КЛ3}} = 12,6 \cdot 0,004 = 0,05 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{КЛ3}} = x_0 \cdot l_{\text{КЛ3}} = 0,1 \cdot 0,004 = 0,0004 \text{ Ом},$$

$$r_{\Sigma 3} = 0,0168 + 0,00062 + 0,15 + 0,00068 + 0,05 = 0,218 \text{ Ом},$$

$$x_{\Sigma 3} = 0,0194 + 0,0019 + 0,004 = 0,0217 \text{ Ом},$$

$$Z_{\Sigma 3} = \sqrt{0,218^2 + 0,0217^2} = 0,219 \text{ Ом}$$

$$I_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,219} = 1,055 \text{ кА}.$$

Ударний струм у точці К<sub>3</sub>.

$$x/r=0,1, \quad K_y=1, \quad i_y = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,055 = 1,492 \text{ кА}.$$

Струм КЗ у точці К<sub>4</sub>.

Загальний опір до точки короткого замикання К<sub>4</sub>:

$$Z_{\Sigma 4} = \sqrt{r_{\Sigma 4}^2 + x_{\Sigma 4}^2}, \quad r_{\Sigma 4} = r_{\Sigma 3} + r_p + r_{\text{ПН3}} + r_{\text{пр}}; \quad X_{\Sigma 4} = X_{\Sigma 3} + X_{\text{пр}},$$

$r_p = 0,0002 \text{ Ом}$  – опір контактів ножів рубильника ШР,

Опір запобіжника ПН-2-100,  $I_{\text{н.вст.}} = 80\text{А}$ ,  $r_{\text{ПН3}} = 0,002 \text{ Ом}$ ,

Опір з'єднувальних проводів АПВ-500 3х(1х4),

$$r_{\text{пр}} = r_0 \cdot l_{\text{пр}} = 7,9 \cdot 0,005 = 0,0395 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{гг}} = x_0 \cdot l_{\text{гг}} = 0,1 \cdot 0,005 = 0,0005 \text{ Ом},$$

$$r_{\Sigma 4} = 0,218 + 0,0002 + 0,002 + 0,0395 = 0,26 \text{ Ом},$$

$$x_{\Sigma 3} = 0,0217 + 0,0005 = 0,0222 \text{ Ом},$$

$$Z_{\Sigma 4} = \sqrt{0,26^2 + 0,0222^2} = 0,261 \text{ Ом},$$

$$I_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,261} = 0,885 \text{ кА кА},$$

$$x/r=0,08, \quad K_y=1, \quad i_y = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,885 = 1,252 \text{ кА}.$$

Вводний автомат «Електрон» Э16-МВ

$$i_{\text{дин}} = 84 \text{ кА} > i_y = 55,54 \text{ кА}.$$

Автоматичний вимикач, що відходить від шин ШМА-1 Е10-МВ

$$i_{\text{дин}} = 84 \text{ кА} > i_y = 55,54 \text{ кА}.$$

Перевірка ШМА-1 3х(40х4)

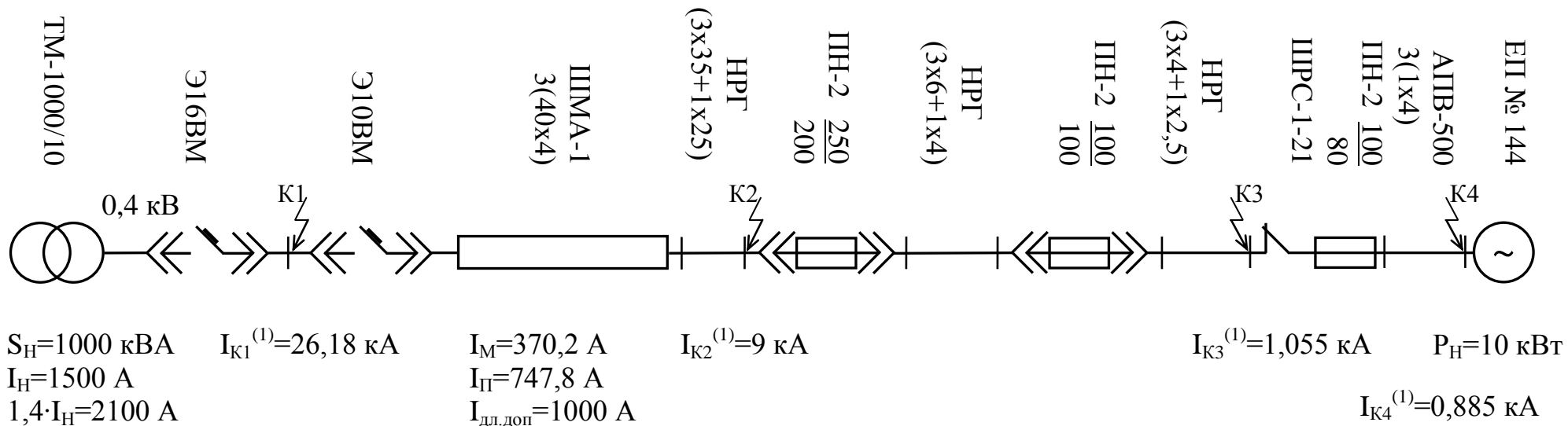
$$i_{\text{дин}} = 25 \text{ кА} > i_y = 15,017 \text{ кА}.$$

### 9.5. Побудова карти селективного захисту

У мережах напругою до 1 кВ необхідно забезпечити селективність дії захисту. Кількість ступенів захисту має бути не більше трьох-чотирьох: відгалуження до електроприймача, розподільча шафа або шина і магістраль від трансформатора. Вставки пристроїв захисту повинні бути перевірені на вибірковість дії послідовно з'єднаних пристроїв захисту, щоб при кожному порушенні нормальної роботи мережі вимикалася тільки пошкоджена ділянка, але не спрацьовували пристрої захисту в колах більшої селективності. (вибірковість у роботі запобіжників буде забезпечена, якщо  $I_{\text{н.вст.}}$  за напрямком потоку енергії відрізнятимуться не менше ніж на два ступені). Перевірка селективності проводиться за типовими часо-амперними характеристиками прийнятих апаратів з урахуванням розкиду характеристик ( $\pm 5 \div 20\%$ ) від середнього значення розрахункових струмів короткого замикання (побудова карти селективності).

Будується карта селективного захисту в логарифмічному масштабі. По осі абсцис відкладають струми: розрахунковий, піковий і короткого замикання. По осі ординат відкладають тривалість пікових струмів, пускових струмів і час спрацьовування захисту відповідно до захисної характеристики.

Перед побудовою карти селективного захисту (рис. 9.3) намічається електричне коло захисту, починаючи від ввідного автоматичного вимикача КТП-9 до, як правило, найбільш віддаленого електроспоживача, у нашому випадку (за номером 144) (рис. 9.2), а потім будується карта селективності дії захисту. По ланцюжку вказуються всі необхідні дані про струми на кожній його ділянці в нормальному режимі та при коротких замиканнях, дані пристроїв захисту в цьому ланцюзі та вставки їх спрацьовування.



Тип апарату захисту	Э16-ВМ	Э10-ВМ	ПН-2-250	ПН-2-100	ПН-2-100
Номинальний струм, $I_H$ (А)	1600	1400	200	100	80
Вставка спрацювання, $I$ (А) - при перевантаженні	1500	1200	—	—	—
- при короткому замиканні	12000	8000	190	95	72
Вставка спрацювання за часом при короткому замиканні, (с)	0,45	0,25	0,007	0,006	0,005

Рис. 9.2. Ланцюг захистів для побудови карти селективності

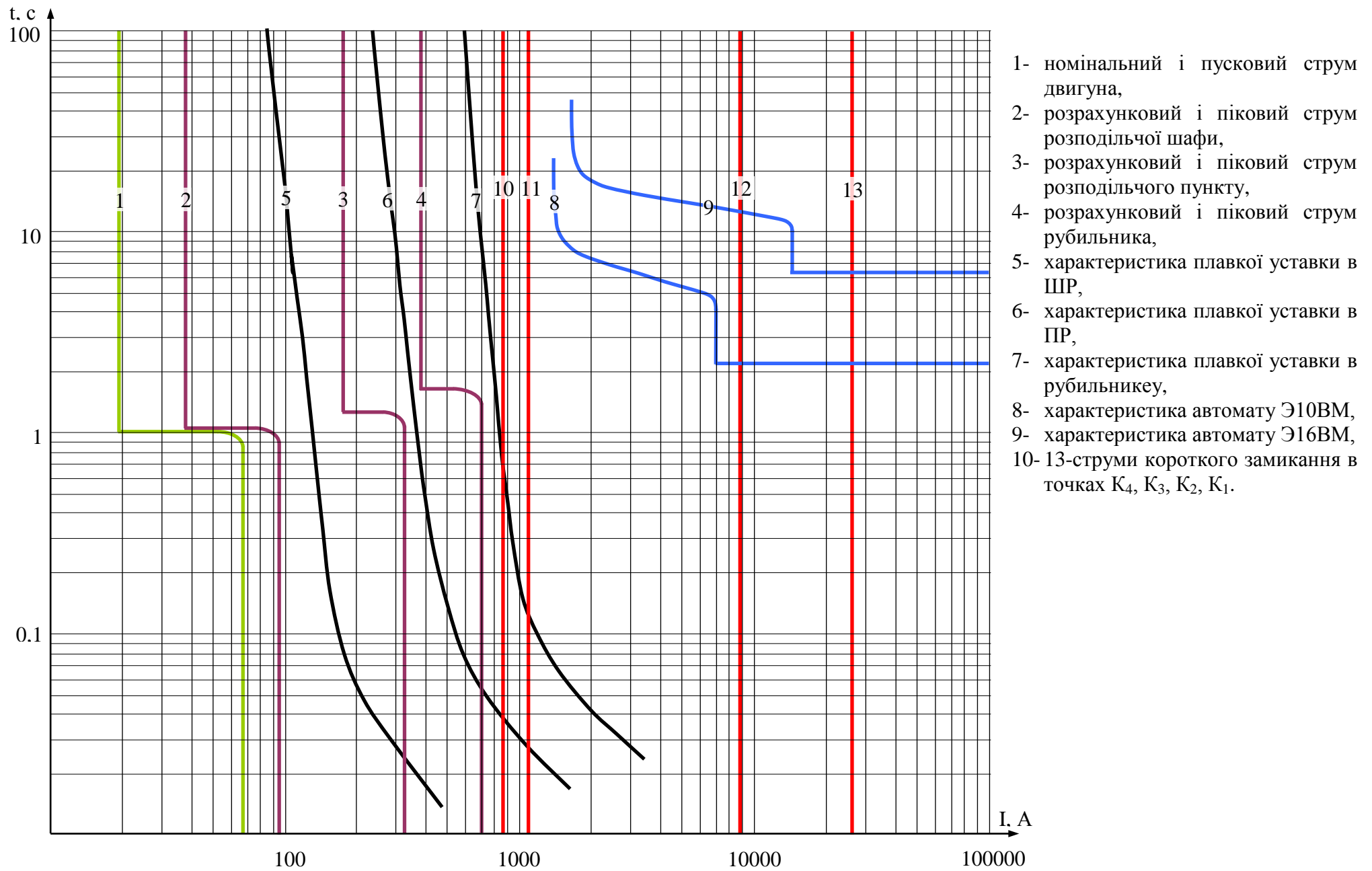


Рис. 9.3. Карта селективного захисту від ТП до найбільш віддаленого електроспоживача

## 9.6. Розрахунок струмів при однофазних замиканнях на землю

У електроустановках напругою 0,4 кВ з заземленою нейтраллю, при замиканнях на землю потрібно забезпечити швидке відключення пошкодженої ділянки, найближчим до місця короткого замикання апаратом захисту та забезпечити безпеку обслуговування та збереження обладнання. Це можна досягнути за рахунок великої провідності в контурі «фаза-нуль». Згідно з ПУЕ переріз нульового проводу має бути не менше 50 % від перерізу фазного проводу. Ця вимога має перевірятися на струм відключення апаратів захисту лінії.

Спрацьовування захисних апаратів може відбуватися тільки при значних струмах короткого замикання в колі. Для цього створюється механічний зв'язок між корпусом обладнання та нейтраллю трансформатора, перетворивши замикання на землю у однофазне коротке замикання.

Згідно з ПУЕ, провідність кола «фаза – нуль» (КТП-ЕП-КТП) має бути такою, щоб струм однофазного короткого замикання на металевий корпус електроспоживача ( $I_{кз}^{(1)}$ ) перевищував би в  $K$  разів номінальний струм апарату захисту (автоматичного вимикача)  $I_{кз}^{(1)} \geq K \cdot I_{на}$ .

Для виконання розрахунків складаємо схему заміщення (див. рис. 9.4) із зазначенням матеріалу та перерізу провідників системи занулення. Для розрахунків  $I_{кз}^{(1)}$  ПУЕ рекомендує використовувати при ньому спрощений вираз:

$$I_{кз}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}}, \text{ кА} \quad (9.11)$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга;  $Z_T$  – опір трансформатора струму;  $Z_{\Sigma}$  – повний опір кола «фаза-нуль».

Обчислимо струм однофазного короткого замикання до електроспоживача за номером 144 на плані цеху ( $P_n = 10$  кВт).

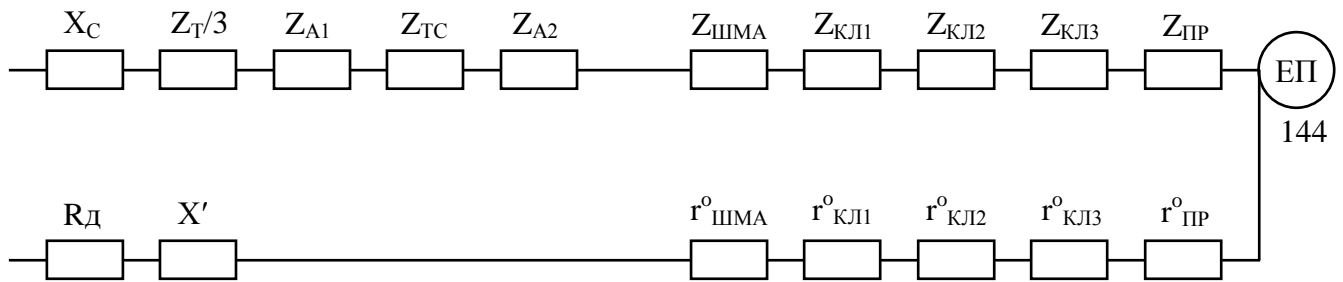


Рис. 9.4. Схема заміщення для розрахунку струму однофазного короткого замикання на землю

$Z_{T/3} = 0,042$  Ом – опір трансформатора при однофазному замиканні на його корпус.

Повний опір кола «фазний-нульовий» провід визначаємо як:

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{д} + R_{н} + R_{ТТ} + R_{а})^2 + (X' + X'' + X_{с} + X_{ТТ} + X_{а})^2}, \quad (9.12)$$

де  $R_{\phi}$ ,  $R_{н}$  – сумарний активний опір фазного й нульового проводів усіх ділянок кола, що розраховується (ТП-ЕП-ТП).

Для проводів з кольорових провідників  $R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l}{S}$ ,

де  $R_{д}=0,03$  Ом – опір дуги у точці КЗ;  $R_{ТТ}=0,00015$  Ом і  $X_{ТТ}=0,00021$  Ом – активний і індуктивний опір трансформатора струму;  $R_{а}$  й  $X_{а}$  – активний і індуктивний опір автоматів. У наведеному ланцюгу є два автоматичні вимикачі, тоді  $R_{а}=2 \cdot 0,00048 = 0,00096$  Ом,  $X_{а}=2 \cdot 0,00099 = 0,00198$  Ом;  $X_{с} = 0,0032$  Ом – опір мережі;  $X' = 0,6$  Ом/км – зовнішній питомий опір кола «фаза-нуль»  $X''=0,6 \cdot 0,09=0,054$  Ом;  $X''=0,6 \cdot R_{СТ}$  – внутрішній індуктивний опір проводів, який враховує для проводів із сталі.

$$R_{\phi} = r_{шма}^{\phi} + r_{кл1}^{\phi} + r_{кл2}^{\phi} + r_{кл3}^{\phi} + r_{пр}^{\phi}$$

Переріз ШМА  $S=40 \times 4=160$  мм<sup>2</sup>;  $l=59$  м,

$$r_{шма}^{\phi} = \frac{1}{32} \cdot \frac{59}{160} = 0,0115 \text{ Ом.}$$

КЛ-1 – НРГ(3x35+1x25);  $l=3,5$  м,

$$r_{кл1}^{\phi} = \frac{1}{32} \cdot \frac{3,5}{35} = 0,0031 \text{ Ом.}$$

КЛ-2 – НРГ(3x6+1x4);  $l=19$  м,

$$r_{кл2}^{\phi} = \frac{1}{32} \cdot \frac{19}{6} = 0,148 \text{ Ом.}$$

КЛ-3 – НРГ(3x4+1x2,5);  $l=2,8$  м,

$$r_{кл3}^{\phi} = \frac{1}{32} \cdot \frac{2,8}{4} = 0,035 \text{ Ом.}$$

Провід АПВ-500 3(1 x 4);  $l=5$  м,

$$r_{пр}^{\phi} = \frac{1}{32} \cdot \frac{5}{4} = 0,0391 \text{ Ом.}$$

$$R_H = r_{шма}^o + r_{кл1}^o + r_{кл2}^o + r_{кл3}^o + r_{пр}^o$$

$$r_{шма}^o = 0,83 \cdot 0,059 = 0,049 \text{ Ом,}$$

$$r_{кл1}^o = \frac{1}{32} \cdot \frac{3,5}{25} = 0,0109 \text{ Ом,}$$

$$r_{кл2}^o = \frac{1}{32} \cdot \frac{19}{4} = 0,238 \text{ Ом,}$$

$$r_{кл3}^o = \frac{1}{32} \cdot \frac{2,8}{2,5} = 0,058 \text{ Ом,}$$

$$r_{пр}^o = 1,59 \cdot 0,005 = 0,00795 \text{ Ом,}$$

$$X'' = 0,6 \cdot (0,049 + 0,00795) = 0,0342 \text{ Ом,}$$

$$R_{\phi} = 0,0115 + 0,0031 + 0,148 + 0,035 + 0,0391 = 0,237 \text{ Ом,}$$

$$R_H = 0,049 + 0,0109 + 0,238 + 0,058 + 0,00795 = 0,357 \text{ Ом,}$$

$$Z_{\pi} = \sqrt{(0,237 + 0,03 + 0,357 + 0,00015 + 0,00096)^2 + (0,054 + 0,0342 + 0,00198)^2} = 0,632 \text{ Ом.}$$

$$I_{кз}^{(1)} = \frac{230}{0,042 + 0,632} = 341,2 \text{ А.}$$

Умова спрацьовування для запобіжників  $I_{кз}^{(1)} \geq I_{н.пл.вст.}^{(1)}$ ;  $341,2 > 200$  А, виконується, що забезпечить нормальну роботу захисту при однофазному короткому замиканні на землю на затискачах електроспоживачів.

## 9.7. Розрахунок відхилення напруги

Розрахунок живильної та розподільчої мережі за умови допустимих втрат напруги та побудова епюри відхилення напруги виконується для схеми живлення найбільш потужного або віддаленого від джерела живлення електроспоживача, у нашому випадку за номером 144 (на плані цеху) для режиму максимального та мінімального навантаження, а також післяаварійного режиму. Згідно з ПУЕ, на шинах напругою 10 кВ має забезпечуватися не менше 105 % від номінальної напруги в період максимальних навантажень та не більше 100 % – в період мінімального навантаження. Для силових мереж відхилення напруги від номінальної має бути не більше  $\pm 5 \%$ , для мережі електричного освітлення промислових підприємств –  $+5\% \div - 2,5 \%$ .

Обчислимо втрати напруги у елементах схеми мережі за формулами:

1. Для трансформатора:

$$\Delta U_{\text{тр}\%} = \beta_{\text{т}} \cdot (U_{\text{а}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{р}} \cdot \sin \varphi_2) + \frac{\beta_{\text{т}}^2}{200} \cdot (U_{\text{а}} \cdot \cos \varphi_2 - U_{\text{р}} \cdot \sin \varphi_2) , \quad (9.13)$$

де  $\cos \varphi_2$  – коефіцієнт потужності вторинної обмотки й відповідне йому значення  $\sin \varphi_2$ .

2. Для ліній мережі:

$$\Delta U_{\text{л}\%} = \frac{P \cdot r + Q \cdot X}{10 \cdot U_{\text{н}}^2} , \quad (9.14)$$

Характеристики елементів електричного кола від ЗРУ-10 кВ до електроспоживача за номером наведені у табл. 9.8.

Таблиця 9.8

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
РУ-10 кВ ГПП				—					144 ЕП
<b>Тип</b>	2x NA2X S2Y6/10kV	NA2X S2Y6/10kV	$S_H = 1\text{MVA}$	ШМА-I	НРГ	НРГ	НРГ	НРГ	АПВ- 500
<b>F, мм</b>	2x(3x240)	3x70	$U_K=5,5\%$	3(40x4)	(3x35+1x25)	(3x6+1x4)	(3x4+1x2,5)	3(1x4)	
<b>L, м</b>	103	231	$\Delta P_{кз}=12,2\text{кВт}$	59	3,5	19	2,8	5	
<b>R, Ом</b>	0,006	0,136	$U_A=1,22\%$	0,0131	0,003	0,14	0,0329	0,0368	
<b>X, Ом</b>	0,004	0,021	$U_P=5,36\%$	0,0106	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	

Далі обчислюємо спад напруги на кожній з ділянок ланцюга та будуємо епюру напруги. За мінімальний режим взято 75 % від максимального навантаження, оскільки не маємо відомості про реальний графік навантаження, а за післяаварійний – один з трансформаторів на цеховій ТП відключений.

Отримані результати наведені у табл 9.9, а епюру напруги зображено на рис. 9.5.

Таблиця 9.9

Реж. нав.	$\delta U_{1,}$ %	$\delta U_{12,}$ %	$\delta U_{2,}$ %	$\delta U_{23,}$ %	$\delta U_{3,}$ %	$\delta U_{34,}$ %	$\delta U_{4,}$ %	$\delta U_{45,}$ %	$\delta U_{5,}$ %	$\delta U_{56,}$ %	$\delta U_{6,}$ %	$\delta U_{67,}$ %	$\delta U_{7,}$ %	$\delta U_{78,}$ %	$\delta U_{8,}$ %	$\delta U_{89,}$ %	$\delta U_{9,}$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>max</b>	+ 5	0,2	4,8	0,03	4,8	0,5	4,3	2,7	1,7	0,2	1,5	1,8	-0,3	0,2	-0,5	0,2	0,7
<b>min</b>	0	0,1	-0,1	0,02	-0,1	0,4	-0,5	2	-2,5	0,1	-2,6	1,3	-3,9	0,1	-4,1	0,2	-4,3
<b>п/ав</b>	- 5	0,2	4,8	0,08	4,8	1,3	3,5	2,7	0,8	0,2	0,6	1,8	-1,2	0,2	-1,3	0,2	-1,6

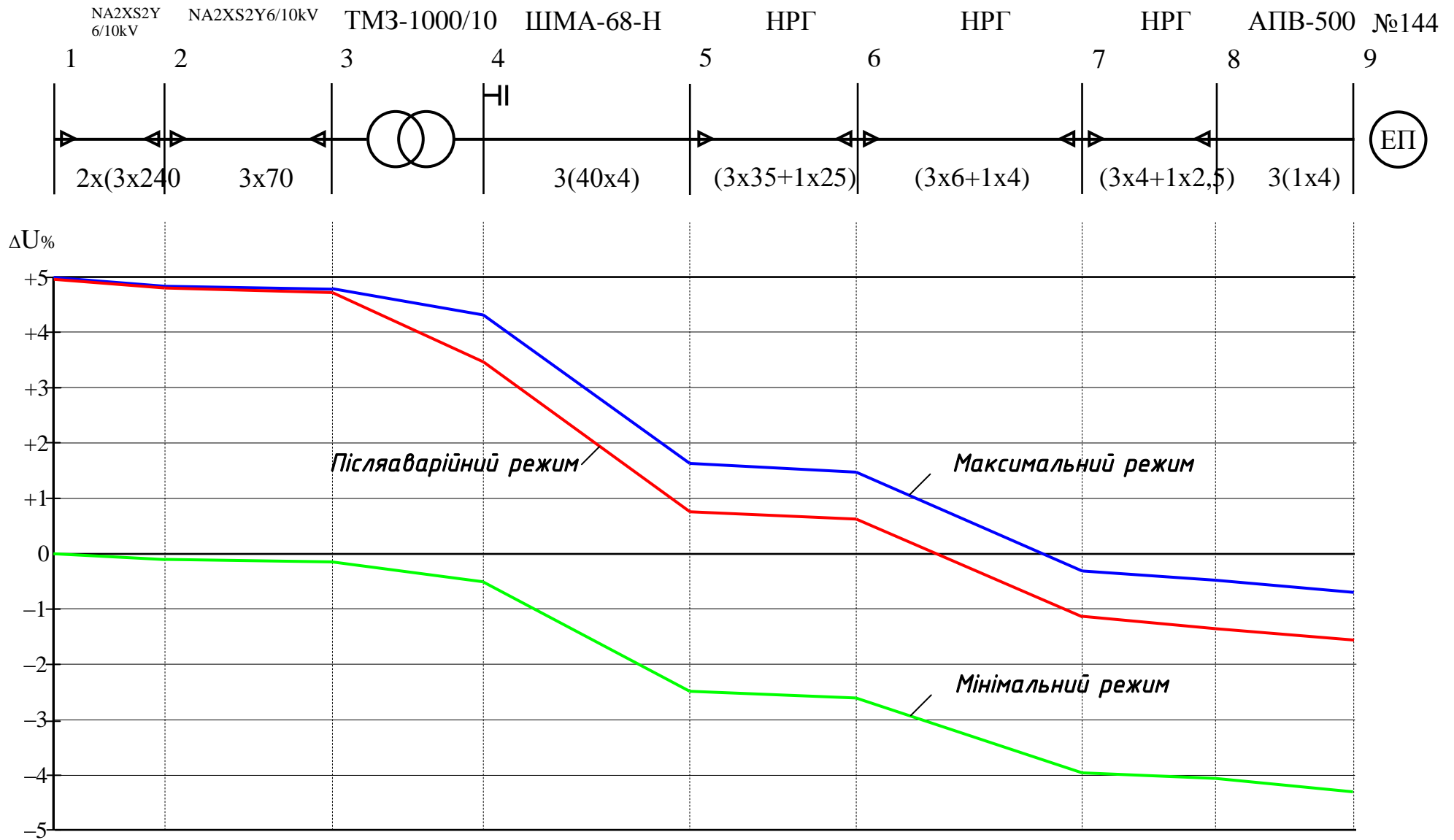


Рис. 9.5. Етюра відхилення напруги

## 10. РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА

Система електропостачання – це складний виробничий комплекс, всі його елементи беруть участь у єдиному виробничому процесі, основними специфічними особливостями якого є швидкоплинність явищ і неминучість пошкоджень аварійного характеру – коротких замикань в електричних установках. Тому надійність функціонування систем електропостачання можлива при широкій автоматизації. Для цієї мети використовуються пристрої автоматичного керування й регулювання.

До пристроїв автоматичного керування відносять:

- пристрої релейного захисту, що діють при пошкодженні електричних установок (короткі замикання між фазами та на землю);
- захист від перевантаження;
- пристрої автоматичного вводу резерву (ПАВР);
- пристрої автоматичного повторного включення (ПАПВ);
- пристрої автоматичного частотного розвантаження (ПАЧР).

До пристроїв автоматичного регулювання відносяться пристрої автоматичного регулювання збудження (ПАРЗ), регулювання напруги в системі електропостачання (застосування апаратів компенсації реактивної потужності й синхронних електродвигунів), регулювання коефіцієнту трансформації трансформаторів (на холостому ході й під навантаженням – ПРПН).

Основні умови надійної роботи систем електропостачання забезпечуються селективністю струмових ступінчатих захистів, забезпечення швидкодії, чутливістю до всіх видів пошкоджень і зміні параметрів ділянок, що захищаються, застосуванням більш простих але надійних схем захисту, а також наявність сигналізації.

Реле, що застосовуються для релейного захисту, класифікуються по:

- а) способу впливу на відключення (прямі й непрямі), б) принципу дії (електромагнітні, електронні, теплові, електродинамічні, магнітоелектричні й т.д.), в) параметру дії (реле струму, напруги, потужності, теплові тощо).

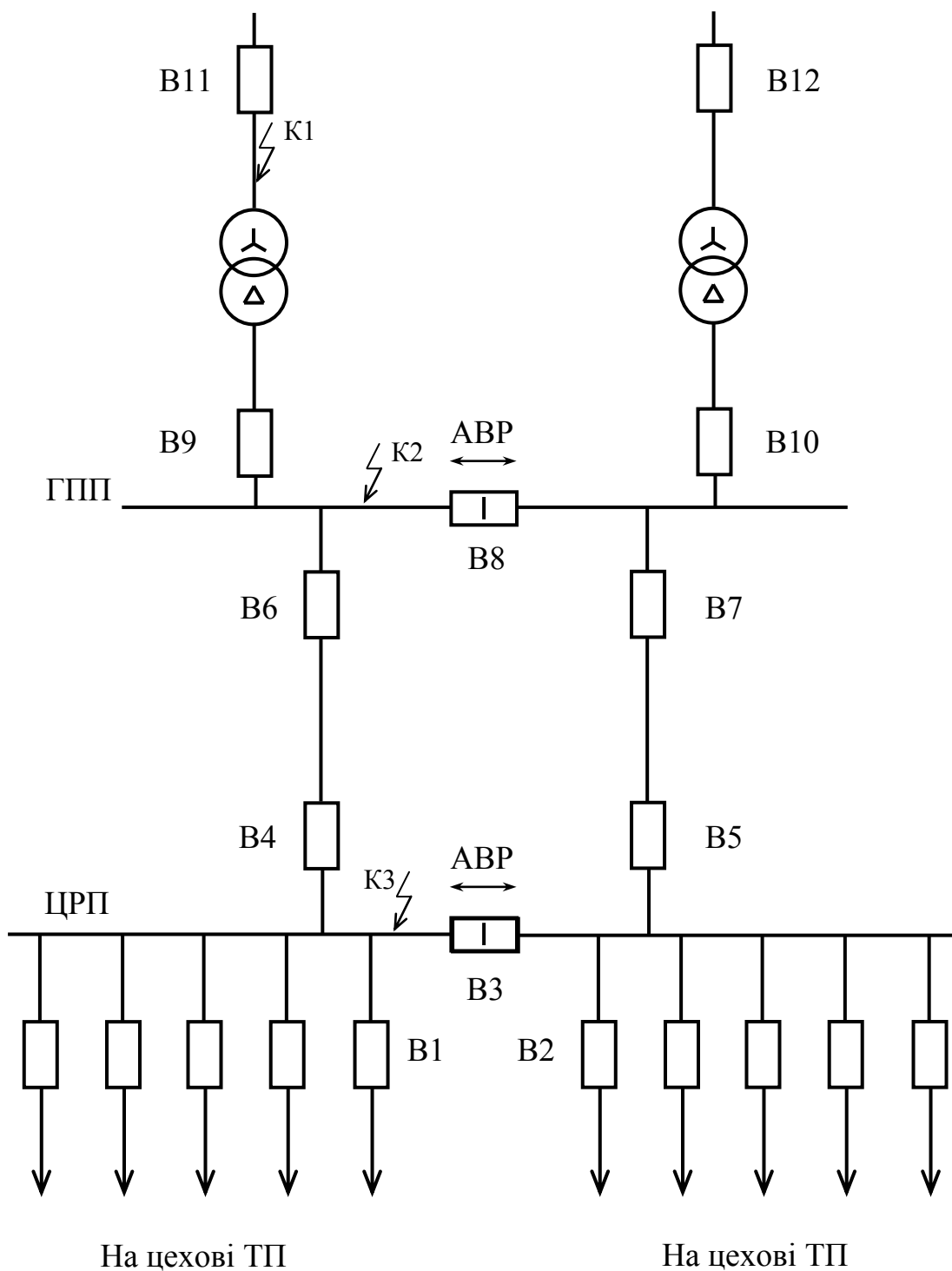


Рис. 10.1 Розрахункова схема струмів короткого замикання

### 10.1. Захист ліній на ділянці від ГПП до ЦРП та до цехових підстанцій

Захист від коротких замикань ліній 10 кВ розподільчих мереж здійснюється переважно за допомогою максимальних струмових захистів.

Розрахунок максимального захисту полягає у виборі:

- струму спрацьовування захисту (первинного),
- струму спрацьовування реле (для певної схеми захисту й типу реле),
- часу спрацьовування реле часу (для захисту з незалежною характеристикою) або характеристики спрацьовування струмових реле (для захисту із залежною характеристикою).

I. *Розрахунок струмів короткого замикання.*

Розрахунок будемо проводити по складеній розрахунковій схемі, наведеній на рис 10.1.

Розрахуємо опори елементів схеми в іменованих одиницях.

Визначимо опір системи:

$$X_c = \frac{U_{НОМ}^2}{S_k} = \frac{35^2}{2500} = 0,49 \text{ Ом.}$$

Опір живильної лінії електропередач, виконаної проводом АС-120:

$$r_{л} = r_0 \cdot l_{л} = 0,33 \cdot 0,96 = 0,317 \text{ Ом,}$$

$$x_{л} = x_0 \cdot l_{л} = 0,353 \cdot 0,96 = 0,339 \text{ Ом,}$$

$$Z_{л} = \sqrt{r_{л}^2 + x_{л}^2} = \sqrt{0,317^2 + 0,339^2} = 0,464 \text{ Ом.}$$

Опір лінії від ГПП до ЦРП, виконаної кабелем 2х НА2ХS2Y6/10kV (3х240):

$$r_{каб} = r_0 \cdot l_{каб} = 0,129 \cdot 0,103 = 0,013 \text{ Ом,}$$

$$x_{каб} = x_0 \cdot l_{каб} = 0,075 \cdot 0,103 = 0,008 \text{ Ом,}$$

$$Z_{каб} = \sqrt{r_{каб}^2 + x_{каб}^2} = \sqrt{0,013^2 + 0,008^2} = 0,015 \text{ Ом.}$$

Опір трансформатора ГПП:

$$X_{тр} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_{ср}^2}{S_{н.тр}} = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{35^2}{16} = 7,27 \text{ Ом.}$$

Струм трифазного короткого замикання в точці К1:

$$I_{кзк1}^{(3)} = \frac{U_б}{\sqrt{3} \cdot (X_c + Z_{л})} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot (0,49 + 0,464)} = 21,2 \text{ кА.}$$

Приведемо струм короткого замикання до  $U_H=10,5$  кВ

$$I_{кзк1}^{(3)} = 21,2 \cdot \frac{35}{10,5} = 70 \text{ кА}$$

Струм трифазного короткого замикання в точці К2:

Опір до точки К2

$$X_{к2} = X_c + X_l + X_{тр} = 0,49 + 0,339 + 7,27 = 8,099 \text{ Ом}$$

$$I_{кзк2}^{(3)} = \frac{U_б}{\sqrt{3} \cdot X_{к2}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 8,099} = 2495 \text{ А}$$

Приведемо струм короткого замикання до  $U_H=10,5$  кВ

$$I_{кзк2}^{(3)} = 2495 \cdot \frac{35}{10,5} = 8317 \text{ А}$$

Струм трифазного короткого замикання в точці К3:

Опір до точки К3

$$X_{к3} = X_{к2} + X_{каб} = 8,099 + 0,008 = 8,107 \text{ Ом},$$

$$I_{кзк3}^{(3)} = \frac{U_б}{\sqrt{3} \cdot X_{к3}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 8,107} = 2493 \text{ А}$$

Приведемо струм короткого замикання до  $U_H=10,5$  кВ

$$I_{кзк3}^{(3)} = 2493 \cdot \frac{35}{10,5} = 8310 \text{ А}$$

II. *Розрахунок струму самозапуску.*

$$X_{нав} = \frac{X_{*нав} \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{роб.макс}}, \quad (10.1)$$

де  $X_{*нав} = 0,35$  – опір узагальненого навантаження,

$I_{роб.макс} = I_{тр.доп} = 180$  А для кабеля NA2XS2Y6/10kV (3x50)

$$X_{нав} = \frac{0,35 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 180} = 11,8 \text{ Ом.}$$

Струм самозапуску:

$$X_{сзп} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot X_{нав}} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 11,8} = 514 \text{ А}$$

Коефіцієнт самозапуску:

$$K_{сзп} = \frac{I_{сзп}}{I_{ном}} = \frac{514}{180} = 2,8.$$

Ш. Вибір струмів спрацювання захистів, установлених на вимикачах.

Вимикачі 1 і 2.

$$I_{сз} \geq \frac{K_H}{K_B} \cdot K_{сзп} \cdot I_{роб.мах} \quad (10.2)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт надійності, рівний 1,2 для реле типу РТ-40;

$K_B$  – коефіцієнт повернення реле, приймаємо рівним 0,8;

$I_{роб.мах.}$  – робочий максимальний струм, приймаємо рівним номінальному струму трансформатора цехової підстанції потужністю 1000 кВ·А з урахуванням коефіцієнта завантаження

$$I_{роб.мах} = \frac{K_{заг} \cdot S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 77 \text{ А},$$

$$I_{сз1,2} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 1,3 \cdot 77 = 150 \text{ А}.$$

Вимикач 3.

1. Відлаштування від струмів самозапуску.

$$I_{сз.3} \geq \frac{K_H}{K_B} \cdot K_{сзп} \cdot I_{роб.мах}$$

де  $I_{роб.мах.}$  – робочий максимальний струм, приймаємо сумі номінальних струмів цехових трансформаторів, заживлених із секції ЦРП, з урахуванням  $K$  завантаження.

$$I_{роб.мах} = \frac{n \cdot S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \cdot K_{заг} = \frac{14 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 0,7 = 539 \text{ А},$$

$$I_{сз3} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 1,3 \cdot 539 = 1077 \text{ А}.$$

2. За умовою узгодження з попереднім захистом.

$$I_{сз} \geq \frac{K_{н.с}}{K_{\rho}} \cdot \left[ (n \cdot I_{сз.попер})_{max} + \sum_1^{N-n} I_{роб.мах} \right], \quad (10.3)$$

де  $K_{н.с}$  – коефіцієнт надійності узгодження, приймаємо рівним 1,25;

$K_{\rho}$  – коефіцієнт струморозподілу.

$$I_{сз3} = \frac{1,25}{1} \cdot (150 + 13 \cdot 38,5) = 813 \text{ А.}$$

Вибираємо більший струм спрацювання захисту із двох умов  $I_{сз3} = 1077 \text{ А.}$

Струм спрацювання реле типу РТ-40 захисту 3

$$I_{ср} = \frac{I_{сз.3} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{ТС}} ;$$

де  $K_{сх}^{(3)}$  – коефіцієнт схеми приймаємо рівним 1;

$n_{ТС}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

$$I_{ср} = \frac{1077 \cdot 1}{600/5} = 8,8 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості

$$K_{чз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8310}{1077} = 6,8 > 1,5$$

Вимикачі 4 і 5.

1. При роботі АВР на ЦРП до навантаження першої секції підключається навантаження другої секції.

$$I_{сз.4;5} \geq K_{н} \cdot (K_{сзп} \cdot I_{роб.махн2} + I_{роб.махн1}) = 1,2 \cdot (2,8 \cdot 539 + 539) = 2458 \text{ А.},$$

$I_{роб.махн1} = I_{роб.махн2} = n \cdot I_{н.тр} \cdot K_{заг}$  – сума номінальних струмів цехових трансформаторів, заживлених із секції ЦРП із урахуванням коефіцієнта завантаження.

$$I_{роб.махн1; н2} = 14 \cdot 55 \cdot 0,7 = 539 \text{ А.}$$

2. За умовою узгодження з попереднім захистом.

$$I_{сз.4;5} \geq K_{нс} \cdot (I_{сз1;2} + I_{роб.мах})$$

$$I_{роб.мах} = \frac{n \cdot S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \cdot K_{зар} = \frac{13 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 0,7 = 500,5 \text{ А},$$

$$I_{сз4;5} = 1,25 \cdot (150 + 500,5) = 813 \text{ А}$$

Вибираємо більший струм спрацювання захисту із двох умов  $I_{сз4;5} = 2458 \text{ А}$ .

Струм спрацювання реле

$$I_{ср} = \frac{2458 \cdot 1}{1000/5} = 12,3 \text{ А}$$

Коефіцієнт чутливості

$$K_{ч4;5}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8310}{2458} = 2,9 > 1,5.$$

Вимикачі 6 і 7.

За умовою узгодження попереднього захисту.

$$I_{сз.6;7} \geq K_{нс} \cdot I_{сз4;5} = 1,1 \cdot 2458 = 2704 \text{ А}$$

Струм спрацювання реле

$$I_{ср} = \frac{2704 \cdot 1}{1000/5} = 13,5 \text{ А}$$

Коефіцієнт чутливості

$$K_{ч6;7}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8310}{2704} = 2,66 > 1,5.$$

Вимикач 8.

1. Відлаштування від струмів самозапуску.

$$I_{сз.8} \geq \frac{K_H}{K_B} \cdot K_{сзп} \cdot I_{роб.мах}$$

де  $I_{роб.мах} = 0,7 \cdot I_{н.тр} = 0,7 \cdot 879,8 = 616 \text{ А}$ ,

$$I_{сз8} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 2,8 \cdot 616 = 2587 \text{ А}$$

2. За умовою узгодження з попереднім захистом.

$I_{сз.8} \geq K_{нс} \cdot I_{сз6;7} = 1,1 \cdot 2704 = 2974 \text{ А}$  – оскільки на шинах секцій ГПП по одному приєднанню.

Вибираємо більший струм спрацювання захисту із двох умов  $I_{сз8} = 2974$  А.

Струм спрацювання реле

$$I_{ср} = \frac{2974 \cdot 1}{1000/5} = 14,9 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості

$$K_{ч8}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8310}{2974} = 2,4 > 1,5.$$

Вимикачі 9 і 10.

I. Автоматичне включення додаткового навантаження при спрацюванні пристрою АВР.

$$I_{сз.9;10} \geq K_H \cdot (K_{сзп} \cdot I_{роб.махт2} + I_{роб.махт1}) = 1,2 \cdot (2,8 \cdot 615,8 + 615,8) = 2808 \text{ А ,}$$

вважаючи, що при введеному в дію АВР трансформатори не повинні бути навантажені більш ніж на  $0,7 \cdot I_{н.тр} = 0,7 \cdot 879,8 = 615,8$ .

II. За умовою узгодження з попереднім захистом.

$I_{сз.9;10} \geq K_{нс} \cdot I_{сз8} = 1,1 \cdot 2974 = 3271$  А , – оскільки, на шинах секцій ГПП по одному приєднанню.

Вибираємо більший струм спрацювання захисту із двох умов  $I_{сз8} = 3271$  А.

Струм спрацювання реле

$$I_{ср} = \frac{3271 \cdot 1}{1000/5} = 16,3 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості захисту для ліній у зоні резервування:

$$K_{ч8}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8310}{3271} = 2,2 > 1,5.$$

Вимикачі 11 і 12.

За умовою узгодження з попереднім захистом.

$$I_{сз.11;12} \geq K_{нс} \cdot I_{сз9;10} = 1,1 \cdot 3271 = 3598 \text{ А ,}$$

або 1199 А зведене до напруги 35кВ.

Струм спрацювання реле

$$I_{cp} = \frac{1199 \cdot 1}{600/5} = 10 \text{ A.}$$

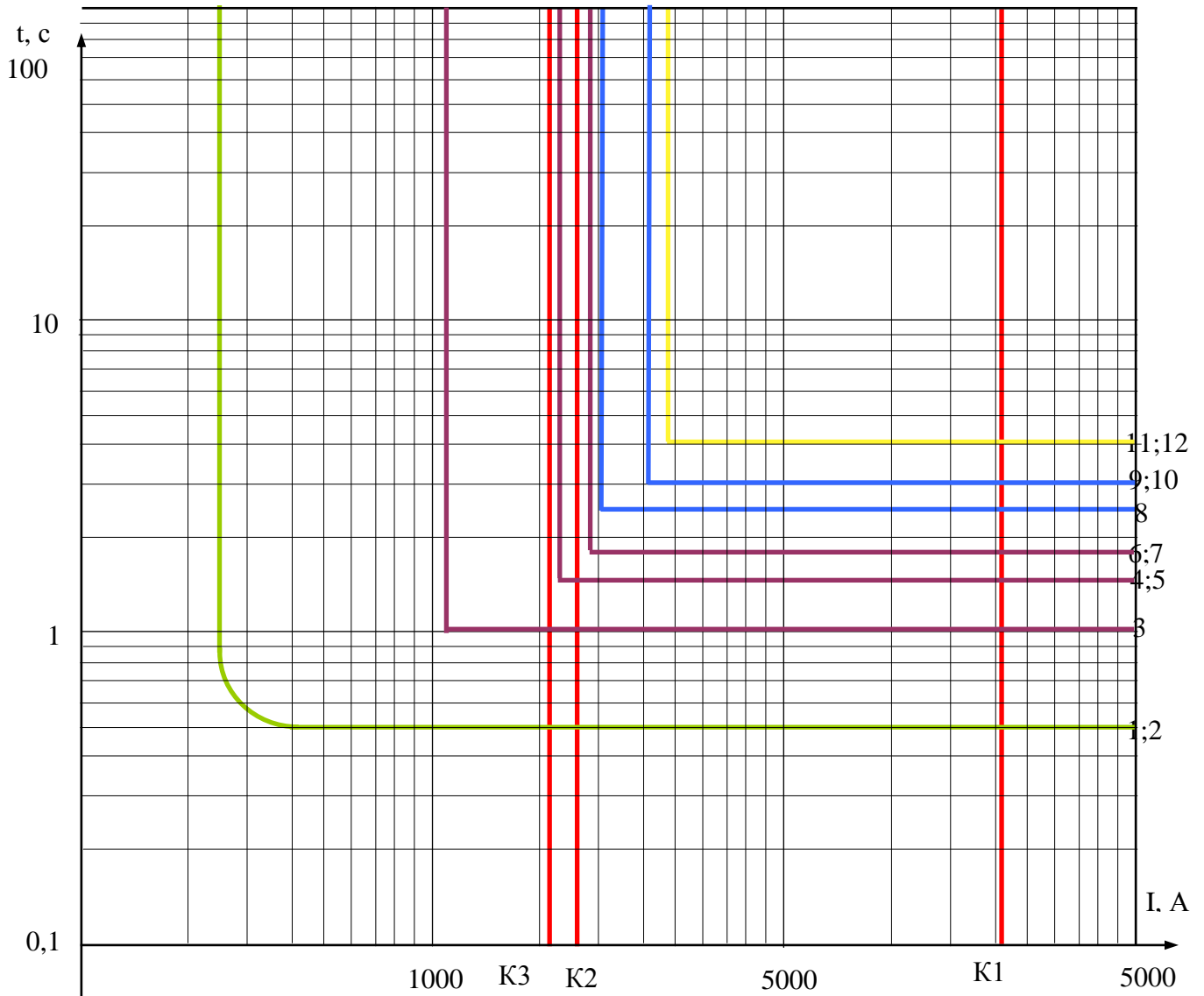


Рис.10.2. Карта селективності дії захистів електромережі заводу

## 10.2. Захист понижувальних трансформаторів

Оскільки, робота трансформаторів у системі ЕППП більше складна, у порівнянні з іншими елементами системи, що супроводжується значним зростанням струму й зміною напруги в режимах, що відрізняються від нормального, то для надійної роботи трансформаторів виникає необхідність установки додаткових спеціалізованих захисних пристроїв.

Для силових трансформаторів, встановлених на підстанціях з напругою 10 кВ і вище повинні (згідно ПУЕ) передбачатися пристрої релейного захисту від

багатофазних коротких замикань в обмотках і на виводах, приєднаних із глухозаземленою нейтраллю, виткових замикань в обмотках, струмів в обмотках при зовнішніх коротких замиканнях і перевантаженнях, зниження рівня масла в маслонаповнених трансформаторах.

У даному проєкті для захисту силових трансформаторів на ГПП (ТДН-16000/35/10,5) передбачаються наступні види захистів:

I. *Поздовжній диференційний струмовий захист*, що діє без витримки часу на відключення пошкодженого трансформатора від непошкодженої частини електричної мережі й інших електроустановок за допомогою лінійних вимикачів. Диференціальний захист використовується як захист від пошкоджень на вводах і від внутрішніх пошкоджень силового трансформатора. Цей захист здійснюється із застосуванням реле струму, що має поліпшене відлаштування від кидків струму намагнічування, перехідних і сталих струмів небалансу. Використовується реле без гальмування типу РНТ-565.

II. *Максимальний струмовий захист* встановлюється на стороні високої напруги. Використовується як захист від струмів зовнішніх і багатофазних коротких замикань. Струмові ланцюги виконані на реле струму типу РТ-40/10.

III. *Газовий захист*, заснований на використанні газоутворення в баку пошкодженого трансформатора. Інтенсивність газоутворення залежить від характеру й розмірів пошкодження, що дозволяє виконати захист із дією на сигнал або відключення. Також він забезпечує контроль за рівнем масла в баку.

Основним елементом газового захисту є газове реле KSG, установлене в мастилопроводі між баком і розширювачем.

На сучасному рівні, у якості реле захисту використовується більше досконале реле РГЧЗ-6 із чашкоподібними елементами, які залежно від положення дають сигнал на спрацьовування сигналізації або на відключення.

IV. *Максимальний струмовий захист* трансформатора виконується аналогічно схемам третього ступеня захисту зі ступінчатою характеристикою. Даний захист призначений для захисту від струмів перевантаження з дією на сигнал з

витримкою часу. Захист встановлюється на стороні високої напруги. У якості реле захисту використовується реле струму РТ-40.

### I. Розрахунок диференційного струмового захисту.

1. Визначаємо первинні струми на сторонах силового трансформатора, що захищається (ТДН-16000/35) у номінальному режимі роботи. Вибираються трансформатори струму й визначаються відповідні вторинні струми в колах захисту.

Первинні номінальні струми трансформатора визначимо за формулами:

$$I_{H.VH} = \frac{S_{H.TP}}{\sqrt{3} \cdot U_{H.VH}} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 249,7 \text{ А};$$

$$I_{H.HH} = \frac{S_{H.TP}}{\sqrt{3} \cdot U_{H.HH}} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 879,8 \text{ А}.$$

Вторинні струми в плечах захисту:

$$I_{2I} = \frac{I_{H.VH} \cdot k_{CX}^{(3)}}{n_{TC}}; \quad I_{2I} = \frac{I_{H.HH} \cdot k_{CX}^{(3)}}{n_{TC}}, \quad (10.4)$$

де  $k_{CX}^{(3)}$  – коефіцієнт схеми, при з'єднанні обмоток трансформатора струму за схемою  $\Delta$  –  $k_{CX}^{(3)} = \sqrt{3}$ , за схемою  $Y$  –  $k_{CX}^{(3)} = 1$ ;

$n_{TC}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Результати розрахунку занесемо в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Найменування величини	Чисельні значення	
	$U_{BH}=37 \text{ кВ}$	$U_{HH}=10,5 \text{ кВ}$
1	2	3
Первинні номінальні струми силового трансформатора $I_{1H}$ , (А)	$\frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 249,7$	$\frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 879,8$
1	2	3
Коефіцієнт трансформації трансформаторів струму $n_{TC}$	$\frac{600}{5}$	$\frac{1000}{5}$
Схема з'єднання обмоток трансформаторів струму	$\Delta$	$Y$
Вторинні струми в плечах захисту, А	$\frac{249,7 \cdot \sqrt{3}}{600/5} = 3,6$	$\frac{879,8 \cdot 1}{1000/5} = 4,4$

2. Визначаємо струми короткого замикання.

Для розрахунку складемо розрахункову схему, зображену на рис. 10.3.

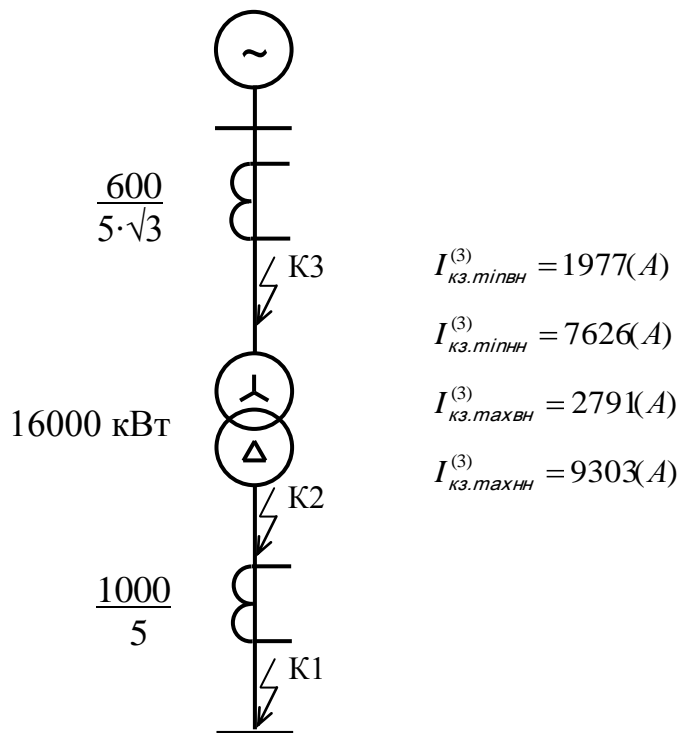


Рис. 10.3. Розрахункова схема захисту трансформатора

Струми короткого замикання були розраховані раніше.

3. Визначаємо первинний струм небалансу, приведений до регульованої сторони високої напруги:

$$I_{н.б} = I'_{н.б} + I''_{н.б}$$

Без урахування складової  $I''_{н.б}$ , оскільки, невідомо наскільки точно вдасться в ході розрахунку підібрати число витків обмотки ТА.

Тут  $I'_{н.б}$  – складова, обумовлена похибкою трансформаторів струму;  $I''_{н.б}$  – складова, обумовлена наявністю РПН у силового трансформатора.

$$I'_{н.б} = K_a \cdot K_{одн} \cdot f_i \cdot I_{кз.вн.тах}^{(3)}, \quad (10.5)$$

$$I''_{н.б} = (\Delta U_1 \cdot K_{ток1} + \Delta U_2 \cdot K_{ток2}) \cdot I_{кз.вн.тах}^{(3)}, \quad (10.6)$$

де  $I_{кз.вн.тах}^{(3)}$  – періодична складова струму зовнішнього трифазного короткого замикання;

$K_a = 1$  – коефіцієнт, що враховує наявність аперіодичної складової струму короткого замикання;

$K_{одн} = 0,5 \dots 1$  – коефіцієнт однотипності трансформаторів струму;

$f_i = 0,1$  – відносне значення повної похибки трансформаторів струму;

$\Delta U_1, \Delta U_2$  – відносні похибки, обумовлені регулюванням напруги на сторонах трансформатора, що захищається  $\Delta U_1, \Delta U_2 = 0,1$ , тобто половина сумарного діапазону регулювання напруги на стороні ВН;

$K_{ТОК1}$  і  $K_{ТОК2}$  – коефіцієнт струморозподілу (приймаються рівними відношенню струму короткого замикання на стороні, де відбувається регулювання, до повного струму зовнішнього короткого замикання) приймаються рівними 0,1;

Таким чином:

$$I_{н.б} = 0,1 \cdot 2791 + (0,1 \cdot 0,1 + 0,1 \cdot 0,1) \cdot 2791 = 334,92 \text{ А.}$$

4. Визначаємо попередньо без урахування  $I_{н.б}'''$  значення струму спрацьовування захисту за умовою відлаштування від струму небалансу

$$I_{сз} \geq K_{над} \cdot I_{н.б} \text{ ,}$$

де  $K_{над}$  – коефіцієнт надійності, що враховує помилку реле й необхідний запас, може бути прийнятий рівним 1,3.

Для реле РНТ  $I_{сз} \geq 1,3 \cdot 334,92 = 435,5 \text{ А}$

За умовою відлаштування від кидка струму намагнічування

$$I_{сз} \geq K_{над} \cdot I_{1н} = 1,3 \cdot 249,7 = 324,6 \text{ А} \text{ , тобто менше } I_{сз} \text{ по небалансу. Таким}$$

чином, розрахунковою умовою для вибору  $I_{сз}$  є відлаштування від струму небалансу:  $I_{сз} = 435,5 \text{ А}$ .

5. Зробимо попередню перевірку чутливості захисту при пошкодженнях у зоні їх дії.

При двофазному короткому замиканні в точці К2 (рис. 10.3) струм пошкодження проходить через обмотки трансформатора струму (ТА) сторони 35

кВ, з'єднані в трикутник. У цьому випадку розрахунковий струм у реле диференційного захисту (при 2-х або 3-х релейному виконанні) визначається для схем трикутника із трьома реле або трикутника із двома реле.

$$I_{p\ min} = \frac{I_{кз\ min\ вн}}{n_{ТС}} \cdot 1,5 = \frac{1977}{120} \cdot 1,5 = 24,7 \text{ А.}$$

Попередньо визначимо струм спрацьовування реле

$$I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{ТТ}} = \frac{435,5 \cdot \sqrt{3}}{120} = 6,3 \text{ А.}$$

Струми в ланцюгах диференційного захисту при даному типу короткого замикання показані на рис. 10.4.

Попереднє значення коефіцієнта чутливості

$$K_{ч}^{(2)} = \frac{I_{p\ min}}{I_{ср}} = \frac{24,7}{6,3} = 3,9 > 2.$$

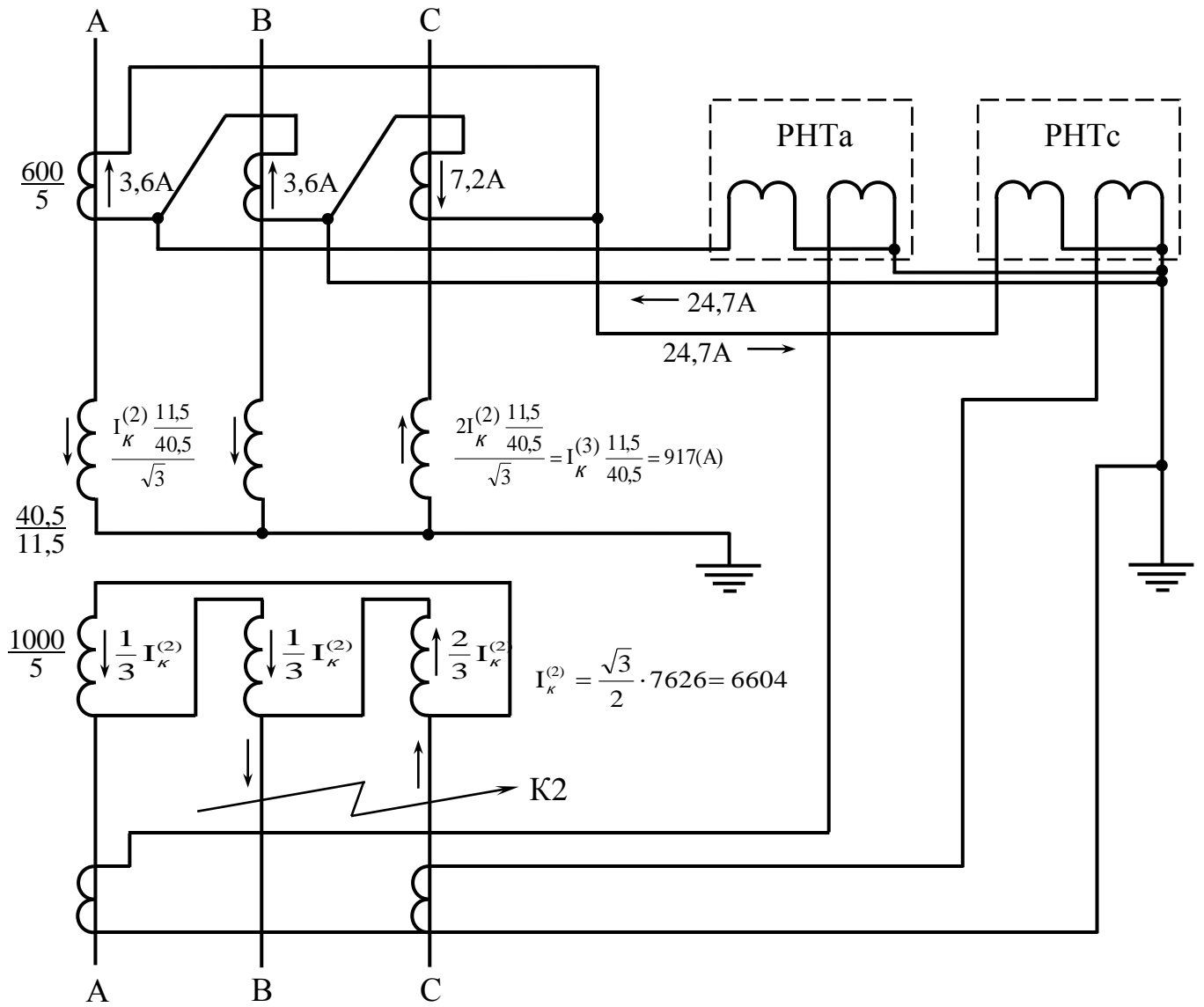


Рис. 10.4. Струмозподіл в колах диференційного струмового захисту трансформатора при двофазному короткому замиканні в точці K2

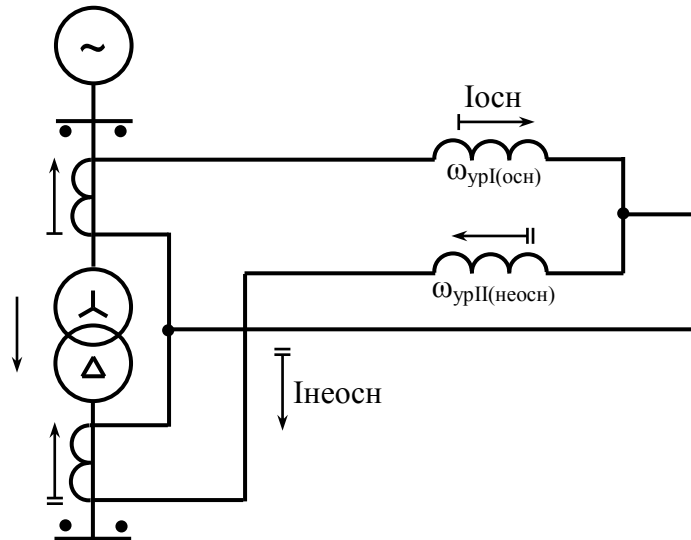


Рис. 10.5. Схема включення обмоток реле типу РНТ

6. Визначаємо число витків обмоток реле з врахуванням того, що на комутаторне реле РНТ -565 можна підібрати практично будь-яке число витків як робочої так і зрівняльної обмоток. Розрахунок починається з вибору числа витків основної сторони (35 кВ), оскільки, це живильна сторона з регульованою напругою.

Результати розрахунків зводимо в табл. 10.2.

Таблиця 10.2

Визначення числа витків обмоток трансформатора, що насичується

№ п/п	Позначення величини й розрахункові вирази	Числове значення
1	2	3
1	Розрахунковий струм спрацьовування реле на основній стороні, (А). Сторона ВН. $I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{тт}}$	$\frac{436 \cdot \sqrt{3}}{120} = 6,3 \text{ А}$
2	Розрахункове число витків обмотки ТА реле для основної сторони, витків $\omega_{осн} = \frac{F_{ср}}{I_{ср.осн}}$	$\frac{100}{6,3} = 15,8$
3	Прийняте число витків обмотки (найближче менше), витків $\omega_{осн}$	15

1	2	3
4	Струм спрацювання реле на основній стороні ВН, (А). $I_{ср.осн} = \frac{F_{ср}}{\omega_{осн}}$	$\frac{100}{15} = 6,7 \text{ А}$
5	Розрахунковий струм спрацювання захисту основної сторони (ВН), (А). $I_{сз} = \frac{I_{ср} \cdot n_{тт}}{\sqrt{3}}$	$\frac{6,7 \cdot 120}{\sqrt{3}} = 464,2 \text{ А}$
6	Розрахунковий струм спрацювання захисту на не основній стороні (НН), (А). $I_{сз.не осн} = \frac{I_{ср.осн} \cdot 37}{10,5}$	$\frac{464,2 \cdot 37}{10,5} = 1635,8 \text{ А}$
7	Розрахункове число витків обмотки ТА реле для не основної сторони (НН), витків $\omega_{1расч} = \frac{\omega_{осн} \cdot I_{2.осн}}{I_{2.не осн}}$	$\frac{15 \cdot 3,6}{4,4} = 12,3$
8	Прийняте число витків (найближче менше), витків $\omega_1$	12
9	Складова: $I_{н.б}''' = \frac{\omega_{1расч} - \omega_1}{\omega_{1расч}} \cdot I_{кзвн тах}^{(3)}$	$\frac{12,3 - 12}{12,3} \cdot 2791 = 68,1 \text{ А}$
10	Первинний розрахунковий струм небалансу з урахуванням $I_{н.б}'''$ , А $I_{н.б} = I'_{н.б} + I''_{н.б} + I_{н.б}'''$	$334,9 + 68,1 = 403 \text{ А}$
11	Струм спрацювання захисту основний (ВН), з урахуванням $I_{н.б}$ , (А) $I_{сз.осн} \geq K_{над} \cdot I_{н.б}$	$1,3 \cdot 403 = 523,9 > 435,5 \text{ А}$
12	Розрахунковий струм спрацювання реле на основній стороні, (А). Сторона ВН. $I_{ср.осн} = \frac{I_{сз.осн} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{тт35}}$	$\frac{523,9 \cdot \sqrt{3}}{120} = 7,6 \text{ А}$
13	Розрахункове число витків обмотки НТА реле для основної сторони (ВН), витки $\omega_{осн} = \frac{F_{ср}}{I_{ср.осн}}$	$\frac{100}{7,6} = 13,2$
14	Прийняте число витків обмотки НТА реле для основної сторони (найближче менше), витки $\omega_{осн}$	13
15	Струм спрацювання реле на основній стороні ВН, (А). $I_{ср.осн} = \frac{F_{ср}}{\omega_{осн}}$	$\frac{100}{13} = 7,7 \text{ А}$

1	2	3
16	Розрахунковий струм спрацювання захисту основної сторони (ВН), (А). $I_{сз осн} = \frac{I_{ср} \cdot n_{тг}}{\sqrt{3}}$	$\frac{7,7 \cdot 120}{\sqrt{3}} = 533,5 \text{ А}$
17	Розрахунковий струм спрацювання захисту на не основній стороні (НН), (А). $I_{сз.не осн} = \frac{I_{ср.осн} \cdot 37}{10,5}$	$\frac{533,5 \cdot 37}{10,5} = 1880 \text{ А}$
18	Розрахункове число витків обмотки НТА реле для не основної сторони (НН), витків $\omega_{1расч} = \frac{\omega_{осн} \cdot I_{2.осн}}{I_{2.не осн}}$	$\frac{13 \cdot 3,6}{4,4} = 10,6$
19	Прийняте число витків обмотки НТА для не основної сторони (найближче ціле), витків $\omega_1$	11
20	Складова: $I''_{н.б} = \frac{\omega_{1расч} - \omega_1}{\omega_{1расч}} \cdot I_{кз вн тах}^{(3)}$	$\frac{10,6 - 11}{10,6} \cdot 2791 = 105,3 \text{ А}$
21	Первинний розрахунковий струм небалансу з урахуванням $I''_{н.б}$ , А $I_{н.б} = I'_{н.б} + I''_{н.б} + I'''_{н.б}$	$334,9 + 105,3 = 440,2$
22	Струм спрацювання захисту основний (ВН), з урахуванням $I_{н.б}$ , (А) $I_{сз.осн} \geq K_{над} \cdot I_{н.б}$	$1,3 \cdot 440,2 = 572,3 > 533,5 \text{ А}$
23	Розрахунковий струм спрацювання реле на основній стороні, (А). Сторона ВН. $I_{ср.осн} = \frac{I_{сз.осн} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{тг35}}$	$\frac{572,3 \cdot \sqrt{3}}{120} = 8,3 \text{ А}$
24	Розрахункове число витків обмотки НТА реле для основної сторони (ВН), витків $\omega_{осн} = \frac{F_{ср}}{I_{ср.осн}}$	$\frac{100}{8,3} = 12,05$
25	Прийняте число витків обмотки НТА реле для основної сторони (найближче менше), витків $\omega_{осн}$	12
26	Струм спрацювання реле на основній стороні ВН, (А). $I_{ср.осн} = \frac{F_{ср}}{\omega_{осн}}$	$\frac{100}{12} = 8,3 \text{ А}$
27	Розрахунковий струм спрацювання захисту основної сторони (ВН), (А). $I_{сз осн} = \frac{I_{ср} \cdot n_{тс}}{\sqrt{3}}$	$\frac{8,3 \cdot 120}{\sqrt{3}} = 575 \text{ А}$
28	Розрахунковий струм спрацювання захисту на не основній стороні (НН), (А). $I_{сз.не осн} = \frac{I_{ср.осн} \cdot 37}{10,5}$	$\frac{575 \cdot 37}{10,5} = 2026,2 \text{ А}$

1	2	3
29	Розрахункове число витків обмотки НТА реле для не основної сторони (НН), витків $\omega_{1расч} = \frac{\omega_{осн} \cdot I_{2.осн}}{I_{2.не осн}}$	$\frac{12 \cdot 3,6}{4,4} = 9,8$
30	Прийняте число витків обмотки НТА для не основної сторони (найближче ціле), витки $\omega_1$	10
31	Складова: $I_{н.б}''' = \frac{\omega_{1расч} - \omega_1}{\omega_{1расч}} \cdot I_{кз вн тах}^{(3)}$	$\frac{9,8 - 10}{9,8} \cdot 2791 = 57 \text{ А}$
32	Первинний розрахунковий струм небалансу з урахуванням $I_{н.б}'''$ , А $I_{н.б} = I'_{н.б} + I''_{н.б} + I_{н.б}'''$	$334,9 + 57 = 391,8$
33	Струм спрацьовування захисту основний (ВН), з урахуванням $I_{н.б}$ , (А) $I_{сз.осн} \geq K_{над} \cdot I_{н.б}$	$1,3 \cdot 391,8 = 509,5 < 575 \text{ А}$
34	Уточнений струм спрацьовування реле на основній стороні, (А). Сторона ВН. $I_{ср.осн} = \frac{I_{сз.осн} \cdot K_{сх}^{(3)}}{n_{тт35}}$	$\frac{509,5 \cdot \sqrt{3}}{120} = 7,4 \text{ А}$
35	Кінцеве прийняте число витків реле НТА для установки на основній стороні (35 кВ) і не основній стороні (10 кВ), витків: $\omega_{осн}$ , $\omega_1$ .	$\omega_{осн} = 12$ $\omega_1 = 10$
36	Перевірка за рівнянням $I_{2.осн} \cdot \omega_{осн} = I_{2.не осн} \cdot \omega_{1расч}$	$3,6 \cdot 12 \approx 4,4 \cdot 10$ $43,2 \approx 44$

Оцінимо чутливість при короткому замиканні в точці К2 у мінімальному режимі роботи системи й двофазному короткому замиканні при кінцево обраних числах витків та струмі спрацьовування реле при проходженні струму короткого замикання по стороні високої напруги.

$$I_{ср} = \frac{100}{12} = 8,3 \text{ А}, \quad I_{р min} = \frac{1,5 \cdot I_{кз min вн}}{n_{тт35}} = \frac{1,5 \cdot 1977}{120} = 24,7 \text{ А},$$

$$K_{чз}^{(2)} = \frac{I_{р min}}{I_{ср}} = \frac{24,7}{8,3} = 2,98 > 2.$$

Таким чином, ми з'ясували, що захист досить чутливий і може бути рекомендований до установки.

Схема диференційного струмового захисту наведена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Трансформатори струму ТАІ і ТАІІ встановлюються поблизу вимикачів. Їхні вторинні обмотки зібрані за схемою поздовжнього диференційного захисту із циркулюючими струмами. При цьому по реле КА, при відсутності пошкоджень у трансформаторі, проходить струм небалансу (див. табл. 10.2).

При виникненні короткого замикання зміниться струм небалансу в більшу сторону й при досягненні  $I_{НБ} \geq I_{СР}$  увімкнеться реле струму КА, що своїм замикаючим контактом включить проміжне реле КL, що у свою чергу подасть живлення на електромагніти YAT1 і YAT2 відключення вимикачів Q1 і Q2. Однак у перший момент включення трансформатора після відключення зовнішнього короткого замикання в обмотці трансформатора з боку джерела живлення виникає кидок струму намагнічування, максимальне значення якого досягає 6-и – 8-ми кратного значення амплітуди номінального струму  $I_{НМГ}$ , проходячи через КА, може викликати неправильне спрацьовування захисту. Однак уже через  $t = 0,3 \div 0,5$ с максимальне значення  $I_{НМГ}$  стає менше амплітуди номінального струму трансформатора. Тому для запобігання помилкового спрацьовування в реле РНТ-565 вбудований проміжний насичуючий трансформатор струму НТА, що згладжує амплітуду  $I_{НМГ}$ .

## II. Розрахунок максимального струмового захисту

Струми спрацьовування захистів і реле на стороні низької й високої напруги були розраховані раніше, на початку розділу й складають:

$$I_{СЗ,НН} = 3271 \text{ А}$$

Струм спрацьовування реле на стороні НН:

$$I_{СР,НН} = 16,3 \text{ А}$$

Струм спрацьовування захисту на стороні ВН:

$$I_{СЗ,ВН} = 1077 \text{ А}$$

Струм спрацьовування реле на стороні ВН:

$$I_{СР,ВН} = 9 \text{ А}$$

Розрахунок найменшого струму трифазного короткого замикання на сторонах трансформатора:

$$I_{кз\ min\ ВН}^{(3)} = 1977 \text{ А}, \quad I_{кз\ min\ НН}^{(3)} = 7626 \text{ А}$$

Значення струмів двофазного короткого замикання:

$$I_{кз\ min\ ВН}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз\ min\ ВН}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1977 = 1712 \text{ А},$$

$$I_{кз\ min\ НН}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз\ min\ НН}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7626 = 6604 \text{ А}$$

Вторинний струм в колах захистів:

$$I_{2\ кз\ min\ ВН}^{(2)} = \frac{K_{сх} \cdot I_{кз\ min\ ВН}^{(2)}}{n_{ТТ\ ВН}} = \frac{1 \cdot 1712}{600/5} = 14,3 \text{ А},$$

$$I_{2\ кз\ min\ НН}^{(2)} = \frac{K_{сх} \cdot I_{кз\ min\ НН}^{(2)}}{n_{ТТ\ НН}} = \frac{1 \cdot 6604}{1000/5} = 33 \text{ А}$$

Коефіцієнт чутливості захисту:

$$K_{ч\ ВН} = \frac{I_{2\ кз\ min\ ВН}^{(2)}}{I_{ср\ ВН}} = \frac{14,3}{9} = 1,59 > 1,5$$

$$K_{ч\ НН} = \frac{I_{2\ кз\ min\ НН}^{(2)}}{I_{ср\ НН}} = \frac{33}{16,3} = 2 > 1,5.$$

Розраховані значення задовільняють вимогам захисту.

У даному проєкті час спрацьовування максимального струмового захисту визначається як:  $t_{сз} = t_{пред} + \Delta t$ , де  $\Delta t = 0,5$  з – ступінь селективності.

Схема максимального струмового захисту представлена на кресленні графічної частини кваліфікаційної роботи. Реле струму захисту КА1 - КА3 з'єднані за схемою повної зірки.

### III. Газовий захист

Газовий захист заснований на заснована на використанні явища газоутворення в баку пошкодженого трансформатора. Інтенсивність

газоутворення залежить від характеру й розмірів ушкодження, що дозволяє виконати захист із дією на сигнал або відключення.

Основним елементом газового захисту є встановлюване в мастилопроводі між баком і розширювачем, газове реле РГЧЗ-6 із чашкоподібними елементами 1 і 2 (рис. 10.6). Елементи у вигляді плоскодонних алюмінієвих чашок обертаються разом з рухливими контактами 4 навколо осей 3. При опусканні чашок рухливі контакти 4 замикаються з нерухливими 5. Нормальне положення контактів (наявність масла в камері реле) зображено на рис.10.6. Зниження рівня масла супроводжується опусканням чашок і замиканням відповідних контактів. Спочатку опускається верхня чашка, і реле діє на сигнал. При інтенсивному га­зоутворенні виникає сильний потік масла й газів з бака в розширювач через газове реле. На шляху потоку є лопать 7, що діє разом з нижньою чашкою на загальний контакт. Лопать повертає й замикає в колі відключення трансформатора (електромагніти УАТ1 і УАТ2 відключення вимикачів Q1 і Q2), якщо швидкість руху масла й газів досягають певного значення, встановленого на реле. Вставка спрацьовування елемента, що відключає, по швидкості потоку масла й газів перебуває в межах 0,6; 0,9; 1,2 м/с. Реле спрацьовує при  $t_{cp} \geq 0,05 \div 0,5$  с.

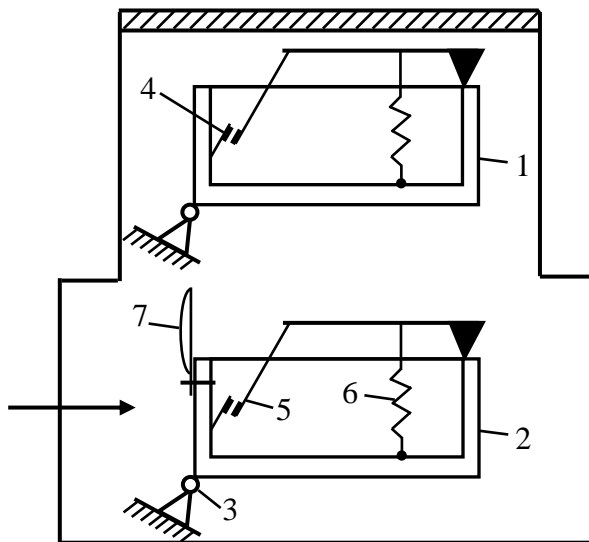


Рис. 10.6. Газове реле захисту трансформатора

загальний контакт. Лопать повертає й замикає в колі відключення трансформатора (електромагніти УАТ1 і УАТ2 відключення вимикачів Q1 і Q2), якщо швидкість руху масла й газів досягають певного значення, встановленого на реле. Вставка спрацьовування елемента, що відключає, по швидкості потоку масла й газів перебуває в межах 0,6; 0,9; 1,2 м/с. Реле спрацьовує при  $t_{cp} \geq 0,05 \div 0,5$  с.

Переваги газового захисту: висока чутливість і реагування практично на всі види пошкоджень всередині баку; порівняно невеликий час спрацьовування; простота виконання й здатність захищати трансформатор при недопустимому зниженні рівня масла з будь-яких причин.

До недоліків газового захисту варто віднести не реагування його на пошкодження поза баком (між вимикачами й трансформатором). Захист може

подіяти помилково при потраплянні повітря в бак трансформатора, наприклад, при доливанні масла. У зв'язку із цим газовий захист не можна використовувати як єдиний захист трансформатора від внутрішніх пошкоджень.

#### IV. Захист від перевантаження

На трансформаторах, поряд із захистами, що діють при пошкодженні в трансформаторі і його з'єднаннях, передбачаються резервні захисти для дії при зовнішніх коротких замиканнях, у випадку відмови захистів і від перевантажень.

Струм спрацьовування захисту від перевантаження розраховується по формулі:

$$I_{cp} = \frac{K_{отс} \cdot K_{сх} \cdot I_{ном тр}}{n_{тс} \cdot K_B}, \quad (10.7)$$

де  $K_{отс} = 1,05$  – коефіцієнт відлаштування реле;

$I_{ном тр}$  – номінальний струм трансформатора на стороні, де встановлюється захист.

Оскільки, захист встановлюється на стороні високої напруги, номінальний струм трансформатора:

$$I_{ном тр} = \frac{S_{тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 264 \text{ А},$$
$$I_{cp} = \frac{K_{отс} \cdot K_{сх} \cdot I_{ном тр}}{n_{тс} \cdot K_B} = \frac{1,05 \cdot 1 \cdot 264}{600/5 \cdot 0,8} = 2,9 \text{ А}.$$

Перевантаження зазвичай є симетричним, тому захист від перевантаження виконаний одним реле струму КА1, включеному в коло одного із трансформаторів струму захисту від зовнішніх коротких замикань.

Для відлаштування від короточасних перевантажень і коротких замикань передбачається реле часу КТ1, розраховане на тривале проходження струму в його обмотках. Витримка часу приймається на ступінь селективності більше чим час спрацьовування захисту трансформатора від зовнішніх коротких замикань. Схема захисту від перевантаження представлена на графічному кресленні кваліфікаційної роботи.

### 10.3. Автоматика

Для забезпечення безперебійності електропостачання споживачів на шинах низької напруги застосовуємо пристрій автоматичного включення резерву (АВР).

Схема АВР наведена на графічному кресленні. Приймаємо умову для автоматичного включення секційного вимикача – при виході з ладу одного із трансформаторів.

Пусковий орган АВР містить мінімальні реле напруги KV1, KV3 і максимальне реле напруги KV2. Витримку часу  $t_{ABP1}$  створює реле часу КТ. Однократність дії забезпечується проміжним реле KLT, що має при поверненні витримку часу  $t_{ABP2}$ . У нормальному режимі вимикач Q2 включений, а вимикач відключений, на першій секції шин (1СШ) є напруга. Контакти мінімальних реле KV1, KV3 розімкнуті, а контакт максимального реле напруги KV2 замкнутий. Допоміжні контакти Q2.1 і Q2.2 вимикача Q2 замкнуті, допоміжний контакт Q2.3 розімкнутий. При цьому реле KLT перебуває у зведеному стані і його контакти замкнуті. Допоміжний контакт QB1.1 замкнутий, коло електромагніта включення УАС підготовлене.

Пристрій АВР діє в такий спосіб. При зникненні напруги на шинах підстанції (1СШ) спрацьовують реле KV1 і KV3, їхні контакти в колі реле часу КТ замикаються. Якщо на другій секції шин (2СШ) є напруга, то реле KV2 перебуває в стані після спрацьовування і його контакт замкнутий. Реле часу приходить у дію, і після закінчення часу  $t_{ABP}$  замикає контакт у колі відключення УАТ2, вимикач відключається. При цьому його допоміжні контакти Q2.1 і Q2.2 розмикаються, а Q2.3 у колі електромагніта включення УАС замикається, роблячи включення вимикача QB.

Напруга спрацьовування мінімальної напруги АВР вибирається так, щоб пусковий орган спрацьовував тільки при повному зникненні напруги й не приходив у дію при знижених напругах викликаних короткими замиканнями або самозапуском електродвигунів. Для виконання цієї умови напруга спрацьовування мінімальної напруги АВР може бути прийняте згідно [6, 7],

$$U_{c.p.} = (0,25 \div 0,4) \cdot U_{ном.}$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга установки

$$U_{\text{ср}} = 0,25 \cdot U_{\text{ном}} = 0,25 \cdot 10000 = 2500 \text{ В.}$$

Напруга спрацьовування реле:

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{сз}}}{K_{\text{т.н.}}} = \frac{2500}{10000/100} = 25 \text{ В.}$$

Витримка часу пускового органу мінімальної напруги АВР повинна бути на ступінь селективності більше витримки часу дії захисту ліній, що відходять. Тобто витримка часу пускового органу мінімальної напруги АВР повинна бути рівна, згідно [6]:

$$t_{\text{АВР}} = t_{\text{Л}} + \Delta t$$

де  $\Delta t$  – ступінь селективності  $\Delta t = 0,4 \div 0,5(\text{с})$ ,

$$t_{\text{АВР}} = 1,7 + 0,4 = 2,1 \text{ с.}$$

Пристрої автоматичного повторного включення є обов'язковим на однострансформаторних підстанціях з однобічним живленням. На двохтрансформаторних підстанціях з однобічним живленням АПВ доцільно встановлювати в тому випадку, якщо відключення одного із трансформаторів викличе перевантаження другого трансформатора й у зв'язку із цим частина споживачів повинна відключитися.

У нашому випадку використання АПВ не доцільно, тому що ГПП двохтрансформаторна й з урахуванням  $S_{\text{р max}} < 1,4 \cdot S_{\text{нт}}$ , обрані нами трансформатори витримують навантаження підприємства.

## 10.4. Структурна схема захисту трансформатора

ТДН-16000/35/10

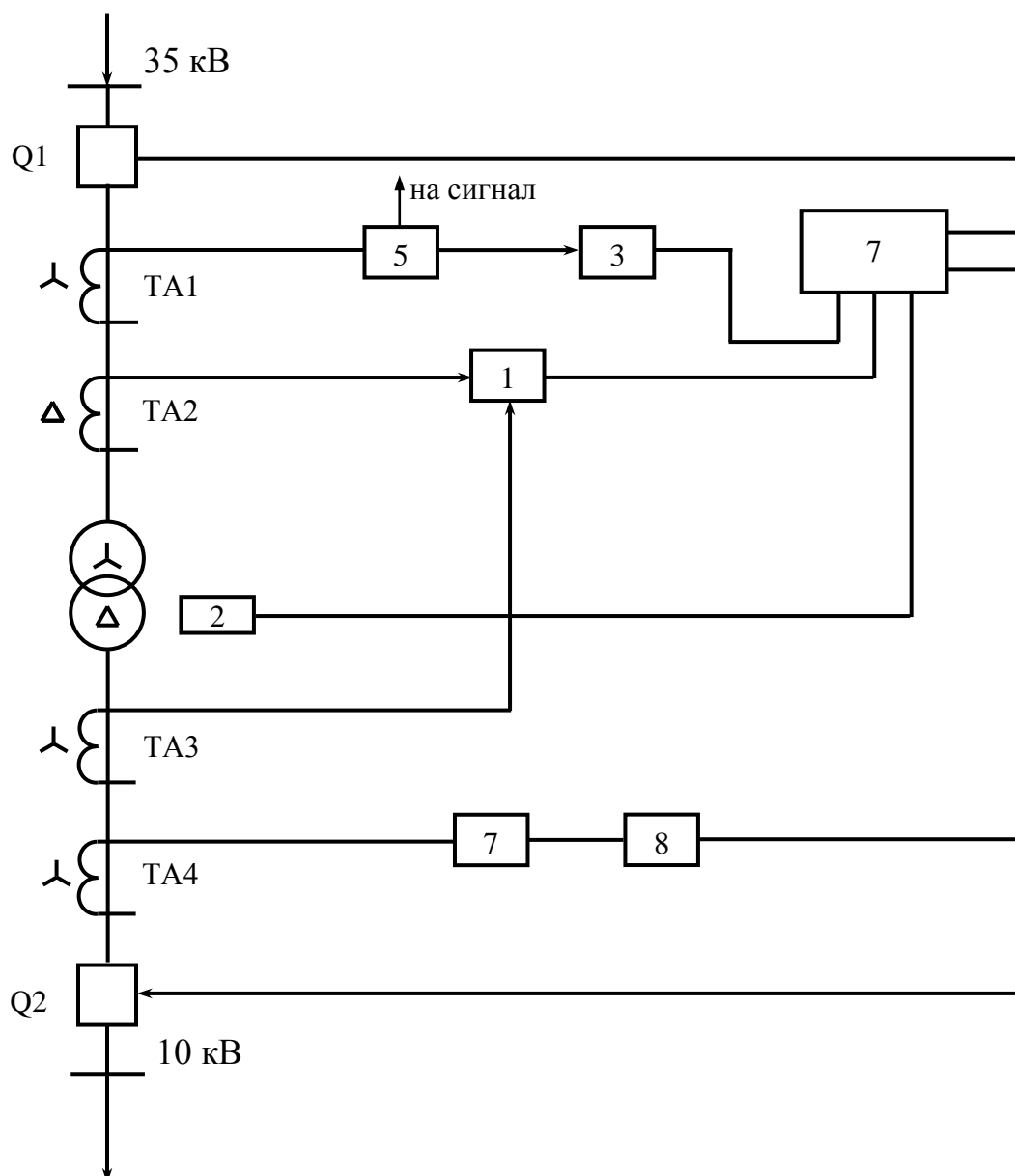


Рис. 10.7. Структурна схема захисту трансформатора.

- 1 – диференціальний захист на реле типу РНТ-565;
- 2 – газовий захист;
- 3,4 – максимальний струмовий захист;
- 5 – захист від перевантаження;
- 7,8 – виконавчий орган захисту.

# 11. СПЕЦПИТАННЯ. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСА ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

## 11.1. Загальні положення

Енергозбереження є одним із важливих, пріоритетних завдань технічної політики нашої держави. На даний час понад 60 % всієї електроенергії електростанцій споживають електроприводи, що дозволяє зробити висновок про високу актуальність завдань енергозбереження при їх експлуатації. На рубежі двадцять першого століття досягнуто значних успіхів у силовій електроніці: освоєно промислове виробництво потужних транзисторів IGBT і силових модулів на їх основі та безпосереднім мікропроцесорним управлінням. Досягнуто колосального прогресу в галузі інформаційно-обчислювальної техніки, мікропроцесорних систем управління та контролю, а також у поглибленні теорії електроприводу змінного струму. Це зумовлює стійку тенденцію розвитку та застосування систем частотного керування, особливо систем електроприводу змінного струму зі скалярним та векторним керуванням. Такі електроприводи не мають обмежень щодо максимальної швидкості обертання та граничної потужності, безконтактні та мають мінімальні експлуатаційні витрати. Цілеспрямоване застосування таких електроприводів дозволяє вирішити актуальні найскладніші завдання виробництва, включаючи завдання енерго та електрозбереження.

Сучасні перетворювачі частоти, використовуючи принцип широтно-імпульсної модуляції, забезпечують формування регульованої трифазної синусоїдальної напруги високої якості, що дозволяє істотно знизити втрати електроенергії в статорних обмотках двигуна при живленні їх від перетворювача частоти. У порівнянні з іншими двигунами, асинхронний двигун має такі основні переваги: простота конструкції, мала інерційність ротора, більш висока надійність роботи (особливо з короткозамкненим ротором), низька вартість та простота монтажу і експлуатації. Все це, у поєднанні з високими

регулювальними та динамічними показниками перетворюють частотний електропривід в домінуючий тип регульованого електроприводу масового використання. З безлічі областей, в яких потрібно вирішувати технологічні питання, пов'язані з регулюванням частоти обертання різних виробничих механізмів і пристроїв, можна виділити найбільш важливі та ефективні напрямки: широке впровадження електроприводів з частотним регулюванням насосів асинхронних двигунів живильних насосів для систем водопостачання, водовідведення та опалення; впровадження частотного електроприводу для регулювання швидкості обертання вентиляторів, нагнітачів, повітродувок і компресорів різних механізмів.

У названих областях за даними статистики приблизно 25 % вироблюваної електроенергії споживають приводи відцентрових насосів і вентиляторів різних об'єктів. Застосування електроприводу з частотним перетворювачем відкриває нову технологію енергозбереження, в якій економиться не тільки електроенергія, але і зберігається теплова енергія і скорочується витрата води за рахунок виключення її витікання, оскільки відсутнє перевищення тиску в магістралі в процесі регулювання витрати. Частотний асинхронний електропривод насосів дозволяє в значній мірі уникнути аварійних ситуацій за рахунок запобігання гідравлічних ударів, що виникають при зміні режимів роботи і пуску насосної системи в порівнянні з нерегульованим електроприводом. Тому в порівнянні з іншими електроприводами, перевагу слід віддати електроприводу на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при живленні статорних обмоток від перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

Сучасний асинхронний електропривод на базі тиристорних перетворювачів напруги (ТПН) використовується для формування статичних та динамічних режимів, наприклад, пуску із обмеженням прискорення, або струму статора. Ці пристрої приваблюють простотою, малими габаритами і невеликою вартістю.

Широке застосування системи ТПН-АД визначає актуальність дослідження його засобами математичного моделювання. Маючи в своєму розпорядженні математичний опис процесів роботи асинхронного двигуна і перетворювача в

статичному і динамічному режимах, можна отримати залежності від часу струмів статора і ротора, визначити втрати в асинхронній машині, проаналізувати можливості їх зниження при використанні енергозберігаючих алгоритмів управління електроприводом в перехідних і сталих режимах і вибрати раціональні за електроспоживанням способи і закони управління асинхронними двигунами.

## 11.2. Дослідження електричного живильного насоса на базі частотного перетворювача

Об'єктом дослідження є електропривод живильного насоса К150-125-315 водогрійного котла на базі частотного перетворювача MIKRO-MASTERvektor та асинхронного двигуна виконання 4A200L4У3.

Параметри асинхронного двигуна 4A200L4У3:

Синхронна частота обертання	$n = 1500$ об/хв
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Номінальна потужність	$P_n = 37000$ Вт
ККД	$\eta = 0,91$
Коефіцієнт потужності двигуна	$\cos\varphi_n = 0,9$
Номінальна фазна напруга	$U_{\phi n} = 220$ В
Число фаз обмотки статора	$m_1 = 3$
Динамічний момент інерції ротора двигуна	$J = 0,368$ кг·м <sup>2</sup>
Кратність критичного моменту	$\lambda = 2,5$
Номінальне ковзання	$S_n = 0,017$

Параметри Г-подібної схеми заміщення (згідно рис. 11.1):

$$x'_\mu = 4,4; \quad x'_1 = 0,086; \quad r'_1 = 0,013; \quad x''_2 = 0,014; \quad r''_2 = 0,018.$$

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{\phi n} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{\phi n} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{37000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,91} = 68,45 \text{ А.}$$

За формулами, що наведені у довіднику:

$$x_1 \cong \frac{2 \cdot x_1' \cdot x_\mu}{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4 \cdot x_1' \cdot x_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,086 \cdot 4,4}{4,4 + \sqrt{4,4^2 + 4 \cdot 0,086 \cdot 4,4}} = 0,084.$$

$$r_1 = r_1' \cdot x_1 / x_1' = 0,013 \cdot 0,084 / 0,086 = 0,01275.$$

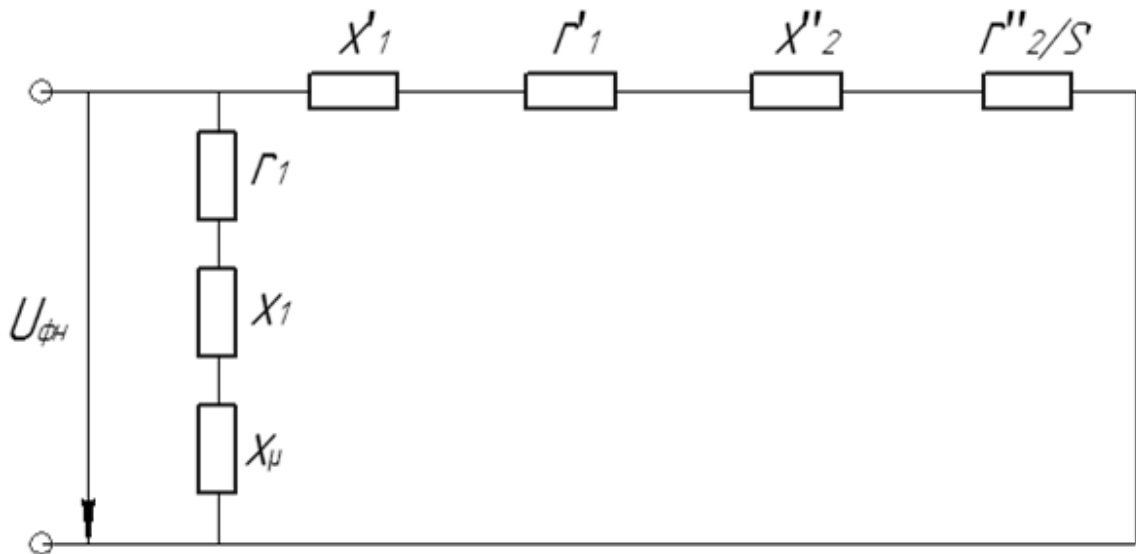


Рис. 11.1. Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна для номінального режиму

Коефіцієнт переводу відносних одиниць у фізичні:

$$c = \frac{U_{\Phi H}}{I_{\Phi H}} = \frac{220}{68,45} = 3,214.$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_s = r_1 \cdot c = 0,01275 \cdot 3,214 = 0,0409 \text{ Ом.}$$

Взаємна індуктивність фаз статора і ротора:

$$L_m = \frac{x_m \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4,4 \cdot 3,214}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,04503 \text{ Гн.}$$

Параметри уточненої схеми заміщення:

$$x_1' = c_1 \cdot x_1; r_1' = c_1 \cdot r_1; r_2'' = c_1 \cdot r_2'; x_2'' = c_1^2 \cdot x_2',$$

$$\text{де } c_1 = \frac{x_1'}{x_1} = \frac{0,086}{0,084} = 1,023.$$

Повна індуктивність фази статора:

$$L_s = \frac{(x_\mu + x_1' / c_1 \cdot c)}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{(4,4 + 0,086 / 1,023 \cdot 3,214)}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0459 \text{ Гн.}$$

Активний опір обмотки ротора:

$$R_r = \frac{r_2'' \cdot c}{c_1^2} = \frac{0,018 \cdot 3,214}{1,023^2} = 0,0552 \text{ Ом.}$$

Повна індуктивність фаз ротора:

$$L_r = \frac{(x_\mu + \frac{x_2''}{c_1^2}) \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{(4,4 + \frac{0,14}{1,023^2}) \cdot 3,214}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0464 \text{ Гн.}$$

Коефіцієнти електромагнітного зв'язку статора та ротора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0,04503}{0,0459} = 0,9812;$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,04503}{0,0464} = 0,9704.$$

Коефіцієнт розсіювання обмоток:

$$\sigma = 1 - k_s \cdot k_r = 1 - 0,9812 \cdot 0,9704 = 0,04777.$$

Перехідні індуктивності статора та ротора:

$$L'_s = L_s \cdot \sigma = 0,0459 \cdot 0,04777 = 0,00219 \text{ Гн};$$

$$L'_r = L_r \cdot \sigma = 0,0464 \cdot 0,04777 = 0,00221 \text{ Гн.}$$

Перехідний активний опір статора:

$$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 1,4 + 0,9764 \cdot 0,8316 = 2,1558 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір намагнічувального контуру:

$$x_\mu = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_m = 2 \cdot 3,1450 \cdot 0,04503 = 14,139 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіювання статора:

$$x'_{s\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_s - L_m) = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,0459 - 0,04503) = 0,2733 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіювання ротора, приведений до статора:

$$x'_{r\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_r - L_m) = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,0464 - 0,04503) = 0,4302 \text{ Ом};$$

$$x'_K = x'_{s\sigma} + x'_{r\sigma} = 0,2733 + 0,4302 = 0,7035 \text{ Ом.}$$

Для визначення моменту двигуна та побудови механічних характеристик при частотному регулюванні використовують Г – подібні спрощені схеми

заміщення, в яких контур намагнічування винесено на вхід схеми без урахування спаду напруги на активному опорі та індуктивному опорі розсіювання статора.

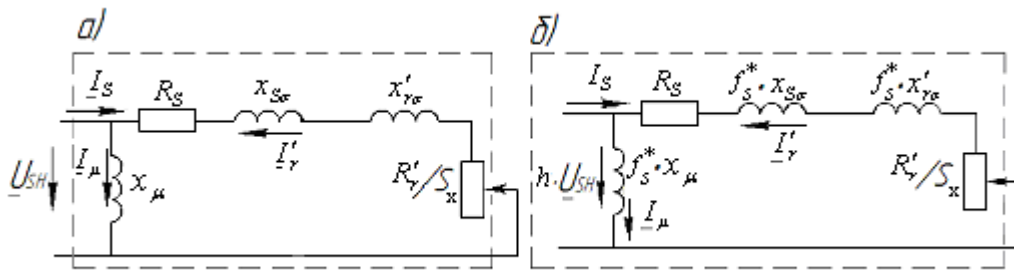


Рис. 11.2. Схеми заміщення асинхронного двигуна при номінальних параметрах мережі (а) та частотному керуванні (б)

Для розрахунку характеристик прийняті позначення:

$$f_s^* = \frac{f_{SX}}{f_{SH}} \text{ – відносна частота напруги живлення статора;}$$

$$h = \frac{U_{SX}}{U_{SH}} \text{ – відносна напруга на статорі двигуна;}$$

$$S_X = \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SX}} = 1 - \frac{\omega}{\omega_{SX} \cdot f_s^*} \text{ – ковзання при заданій частоті;}$$

$$\beta = \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SH}} = f_s^* \cdot \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SX}} \cdot \frac{\omega_{SX}}{\omega_{SH}} = S_X \cdot f_s^* \text{ – абсолютне ковзання, що}$$

характеризує нахил механічної характеристики при зміні частоти напруги живлення.

З використанням відомих залежностей швидкості обертання та моменту на валу двигуна, в програмі MATLAB складений скрипт для розрахунку та побудови сімейства механічних характеристик.

```

%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем  $\omega_{zn}=314$  рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора  $w=y$ :
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент  $M=x$ :
[x1]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.8;[y2]=157*f*(1-s);
[x2]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.6;[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.4;[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.2;[y5]=157*f*(1-s);
[x5]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
xlabel('x (Hm)'),ylabel('y(1/c)')

```

Рис. 11.3. Скрипт обчислення механічних характеристик АД

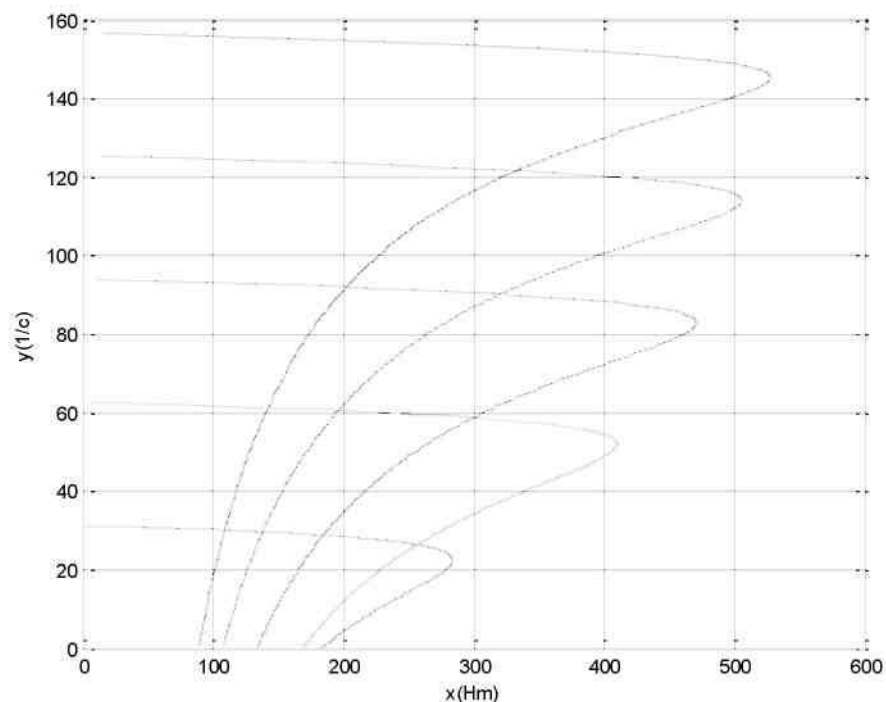


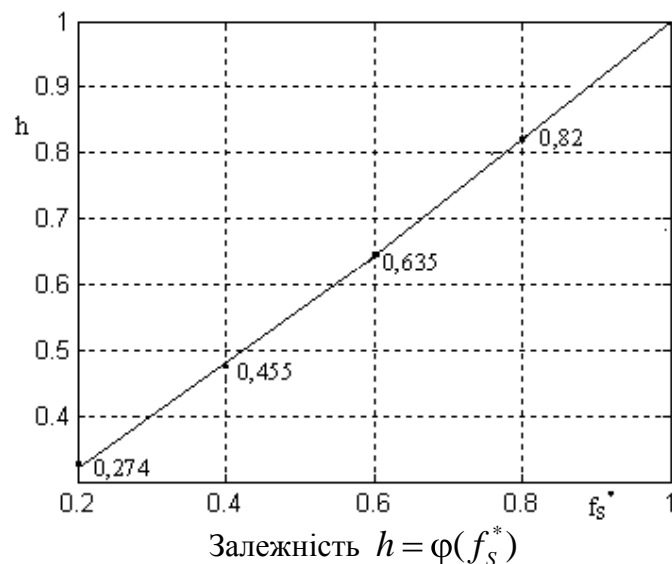
Рис. 11.4. Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному

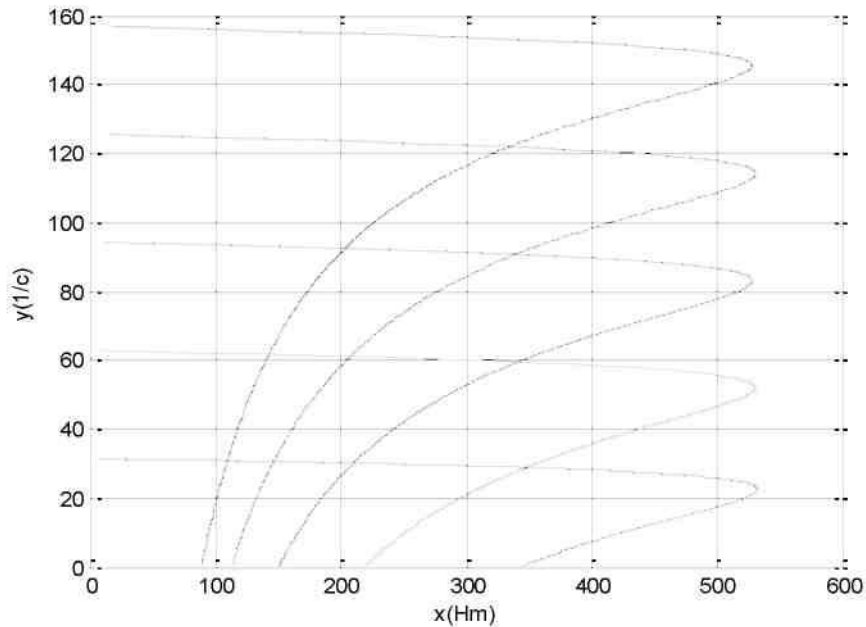
регулюванні  $\frac{U_s}{f_s} = const$

З наведених характеристик випливає, що при зниженні частоти зменшується величина критичного моменту і знижується жорсткість характеристик. Ця обставина пояснюється тим, що зі зростанням навантаження відбувається спад напруги на активному опорі статорної обмотки. У свою чергу, це призводить до зменшення магнітного потоку і, відповідно, до зниження електромагнітного моменту. Для збереження постійності перекидаючого моменту двигуна необхідно величину живильної напруги на статорі в процесі регулювання зменшувати в меншій степені, ніж частоту. Для побудови механічних характеристик при  $M_k = const$  необхідно обчислити відносні величини напруги на статорі двигуна при зміні частоти, використовуючи такий вираз:

$$527 = \frac{3 \cdot h^2 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot f_s^* \cdot (0,13 + \sqrt{0,13 + (f_s^* \cdot 0,735)^2})}$$

У ході розрахунку отримаємо: 1) при  $f_s^* = 0,2$  величина  $h=0,274$ ; 2) при  $f_s^*=0,4$  величина  $h=0,455$ ; 3) при  $f_s^*=0,6$  величина  $h=0,635$ ; 4) при  $f_s^*=0,8$  величина  $h=0,82$ . Наведені результати розрахунку дозволяють побудувати функціональну залежність  $h = \varphi(f_s^*)$ .





*Рис. 11.5. Механічні характеристики асинхронного двигуна з Ir компенсацією*

Як видно із механічних характеристик (рис. 11.5) перевантажувальна здатність двигуна залишається постійною, а жорсткість відповідає жорсткості природної характеристики закону частотного регулювання.

Досліджувальний живильний насос має вентиляторне навантаження  $M_c = c \cdot \omega^2$ .

Для визначення механічних характеристик двигуна живильного насоса при вентиляторному навантаженні розроблений спеціальний скрипт для частот 50 Гц, 42,5 Гц та 35 Гц. Коефіцієнт пропорційності як:  $k = \frac{U_s}{f_{SH}^2}$ .

```

%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Принимаем  $\omega_{zn}=157$  рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора  $\omega=y$ :
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=50$ Гц и  $U=220$  В :
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя,обозначаем момент  $M=x$ :
[x1]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=42,2$  Гц и  $U=158$  В:
;s=[0.001:0.005:1];f=0.85;h=0.72;
[y2]=157*f*(1-s)
[x2]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=35$  Гц и  $U=110$  В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.7;h=0.5;
[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=25$  Гц и  $U=55$  В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.5;h=0.25;
[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4),grid
xlabel('x(Нм)'),ylabel('y(1/c)')

```

Рис. 11.6. Скрипт обчислення механічних характеристик при вентиляторному навантаженні

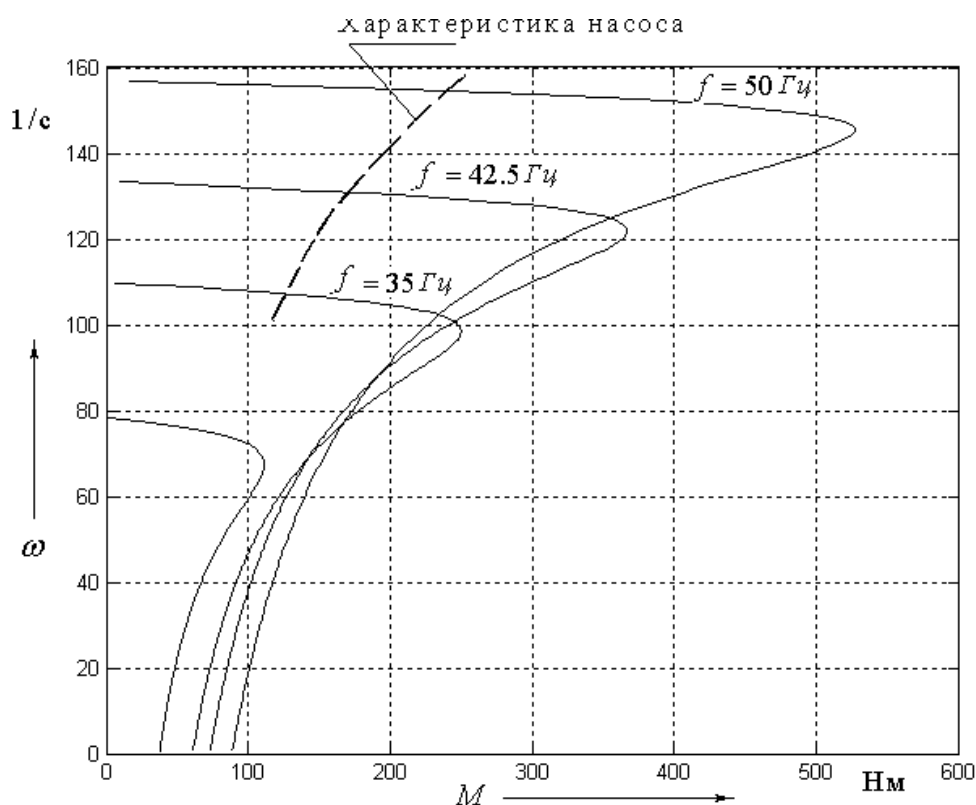


Рис. 11.7. Механічні характеристики при вентиляторному навантаженні

### **11.3. Математичне моделювання системи електроприводу за допомогою програми Matlab-Simulink**

Метод математичного моделювання є найбільш поширеним методом дослідження асинхронних електроприводів з вентильними перетворювачами, завдяки високій точності і практично необмеженим можливостям з урахування нелінійностей будь-якого характеру. Відомо і використовується багато варіантів моделей асинхронного двигуна і тиристорного перетворювача напруги.

Проте, розробки нових адекватних швидкодіючих моделей, оцінки необхідних для урахування параметрів і способів їх урахування, є як і раніше, актуальними.

Одним з найпоширеніших дослідницьких пакетів є MATLAB Simulink, його засобами можливе математичне моделювання практично будь-яких електромеханічних систем.

Проте, вкладені бібліотеки, які описують електромеханічні перетворювачі, а перш за все асинхронний двигун мають ряд обмежень, перш за все по урахуванню нелінійності параметрів. Ці функціональні обмеження не дозволяють отримати модель системи ТПН-АД адекватну фізичним процесам в реальному електроприводі для всіх режимів роботи. Актуальною представляється створення інноваційної моделі ТПН-АД, що виконана в MATLAB Simulink, яка б, будучи нелінійною, дозволяла б вирішувати всі поставлені перед нею завдання.

#### **1.1. Класифікація математичних моделей АД**

Трифазний асинхронний двигун з точки зору теорії автоматичного керування є нелінійним багатомірним об'єктом із досить складною структурою. При його математичному описі величезне значення має коректність прийнятих у кожному конкретному випадку припущень.

Різноманітність математичних моделей АД пов'язана зі способом живлення двигуна, з особливостями його конструкції (фазний ротор, біляча клітка, подвійна біляча клітка), зі зробленими при математичному описі припущеннями, із системою координат, у якій виконано його математичний опис, зі складом

вхідних і вихідних сигналів моделі та із системою прийнятих відносних величин (у разі їхнього використання).

Моделі АД, для яких вхідними сигналами є напруги статора, називають напруговими, а моделі, в яких вхідними сигналами є струми статора, – струмовими. Перші використовують при моделюванні двигунів, що живляться від джерел змінної ЕРС, а другі – при живленні двигунів від джерел змінного струму. Наприклад, при частотному керуванні АД застосовуються перетворювачі частоти з автономними інверторами напруги (АІН) та з автономними інверторами струму (АІС).

Залежно від прийнятої системи координат (СК) моделі асинхронних двигунів розподіляються на моделі у природних трифазних системах координат статора ( $ABC$ ) та ротора ( $abc$ ), моделі у двофазних ортогональних системах координат та моделі з використанням ефективних або амплітудних значень електромагнітних сигналів (назвемо їх умовно однофазними моделями).

«Однофазні» моделі відрізняються більш-менш точним відображенням статичних властивостей АД, дуже спрощеним відображенням динамічних властивостей та відсутністю інформації про миттєві значення фазних сигналів. Отже, їх доцільно використовувати переважно для дослідження двигунів, що працюють у тривалому режимі роботи або при малих діапазонах регулювання швидкості. Це стосується систем «тиристорний регулятор напруги (ТРН)–АД», асинхронно-вентильних каскадів (АВК), двигунів з реостатним пуском. Ще більш спрощені лінійні «однофазні» моделі АД часто застосовують при дослідженні технологічних процесів, які протікають значно повільніше, ніж електромагнітні процеси у двигуні.

*Трифазні моделі у природних фазних координатах статора та ротора* характеризуються високим порядком системи диференціальних рівнянь, що описують двигун, наявністю в моделі гармонічних коефіцієнтів та необхідністю вирішення на кожному кроці чисельного інтегрування системи лінійних рівнянь зі змінними коефіцієнтами для визначення струмів статора і ротора. Ці недоліки компенсуються можливістю дослідження різноманітних несиметричних режимів.

*Двофазні моделі* розподіляються між собою залежно від швидкості обертання системи координат та її орієнтації, а також від наявності в них тих чи інших сигналів. Вони створюються за допомогою розкладання просторових (узагальнених) векторів фазних величин на ортогональні осі відповідних СК; одна з осей при цьому умовно вважається дійсною, інша – уявною.

За швидкістю обертання ортогональні СК розподіляються на *нерухомі*, або *стаціонарні* ( $\omega_k = 0$ ) та *обертові* ( $\omega_k \neq 0$ ). СК, що обертаються з кутовою швидкістю, яка дорівнює кутовій частоті джерела живлення АД ( $\omega_k = 2\pi f_s$ ) називають *синхронними*.

За орієнтацією ортогональні системи розділяються на СК, прив'язані до однієї з електричних осей статора або ротора (зазвичай  $A$  і  $a$  відповідно) та СК, прив'язані до будь якого з узагальнених (просторових) векторів фазних величин АД: напруги або ЕРС статора або ротора; струму статора, ротора або струму намагнічування; потокозчеплення статора, ротора або потокозчеплення у повітряному зазорі. Зазвичай дійсна вісь ортогональної СК спрямовується впродовж відповідного вектору або «електричної» осі, а уявна – повернута відносно дійсної на кут  $90^\circ$  проти годинникової стрілки. Узагальнений вектор  $\tilde{\omega}$ , за яким орієнтована СК, називають *опорним*.

Особливістю обертових систем координат, орієнтованих за деяким опорним вектором, є те, що дійсна складова опорного вектору дорівнює амплітудному значенню відповідного фазного сигналу ( $v_{re} = v_m$ ), а уявна складова цього вектору відсутня, тобто дорівнює 0 ( $v_{im} = 0$ ). Це приводить до зменшення загальної кількості сигналів у моделі та відповідно до її спрощення.

Найчастіше при створенні двофазних моделей та при виконанні еквівалентних координатних перетворень використовують такі СК:

- *нерухому (стаціонарну) СК статора*, в якій дійсна ось суміщається з віссю  $A$  статора;
- *рухому СК з довільною швидкістю обертання*;
- *прив'язану до осі  $a$  ротора рухому СК ротора*;

- *синхронні обертові системи координат*, орієнтовані за вектором напруги статора (для напругових моделей) або за струмом статора (для струмових моделей);

- *обертові системи координат*, орієнтовані за вектором потокозчеплення ротора, за вектором потокозчеплення статора або за вектором потокозчеплення у повітряному зазорі (потокозчеплення намагнічування).

*Моделі АД в синхронних оберткових системах координат статора* зручно використовувати для синтезу та дослідження систем скалярного частотного керування та пристроїв плавного пуску асинхронних двигунів, тому що вхідними сигналами таких моделей є частота та амплітуда напруги або струму статора статора.

*Моделі АД в оберткових системах координат, орієнтованих за векторами потокозчеплення*, використовуються для синтезу та аналізу різноманітних систем векторного керування (СВК). Зокрема, орієнтація за потокозчепленням ротора застосовується у так званих полеорієнтованих СВК (FOC – *Field Oriented Control*), а орієнтація за потокозчепленням статора – в СВК з прямим керуванням моментом (DTC – *Direct Torque Control*). Усі фазні величини в таких системах координат втрачають свою періодичність, що значно спрощує синтез регуляторів.

Усі обертові СК є окремими випадками рухомої СК з довільною швидкістю обертання. *Рухома СК ротора, прив'язана до осі а ротора*, застосовується для проміжного перетворення фазних сигналів ротора в будь-які інші ортогональні СК.

Двофазні моделі у порівнянні з трифазними мають менший порядок і більш прості залежності для розрахунку струмів і моментів. Однак вони не можуть застосовуватися для дослідження несиметричних режимів. Точніше, для дослідження несиметричних режимів можна створити двофазні моделі, але вони будуть набагато складнішими та залежними від різновидності досліджуваного режиму.

Необхідно відзначити, що *всі двофазні моделі отримують із трифазних методом еквівалентних координатних перетворень*, тобто всі вони теоретично в однакових умовах при правильно обраних методах і параметрах розрахунку перехідних процесів повинні давати практично однакові результати. Можливі лише невеликі відхилення в чисельних даних, практично не помітні при візуалізації перехідних процесів.

Вибір системи координат та конфігурації моделі, тобто складу вхідних та вихідних сигналів, залежить від структури системи керування, зокрема від сукупності сигналів, за допомогою яких зорганізуються зворотні зв'язки, та від особливостей джерела живлення двигуна.

### **11.3.1. Припущення при розробці моделей АД**

Щоб отримати більш-менш доступні для дослідження математичні моделі АД, при їх розробці на першому етапі зазвичай роблять такі допущення:

- намагнічувальні сили обмоток розподілені синусоїдально вздовж кола рівномірного повітряного зазору, тобто відсутні вищі гармоніки магнітного потоку;
- втрати та насичення магнітних кіл у сталі статора та ротора відсутні;
- обмотки статора та ротора симетричні, тобто фазні обмотки мають однакову кількість витків;
- комплексні опори обмоток не мають ємних складових;
- параметри обмоток ротора приведені до статора;
- відсутнє явище витиснення струму з пазів;
- джерело живлення є ідеальним джерелом ЕРС або струму.

Далі моделі можна ускладнювати залежно від того, яке саме із знехтуваних явищ повинно бути досліджено.

При використанні моделей АД у трифазних природних координатах досить просто можна врахувати асиметрію електромагнітних параметрів фаз статора і ротора, несинусоїдальність і асиметрію сигналів живлення, наявність в них вищих гармонійних складових, тощо.

### 11.3.2. Математичне моделювання досліджуваного електроприводу

Для математичного опису та моделювання асинхронного електротроприводу, узагальнені вектори величин асинхронного двигуна записуються в ортогональній системі координат  $\alpha, \beta$ , нерухомої по відношенню до статора.

$$U_S = U_{S\alpha} + j \cdot U_{S\beta}; i_S = i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}; \psi_S = \psi_{S\alpha} + j \cdot \psi_{S\beta}; \psi_r = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta} \quad (11.1)$$

Система координат, зручна при аналізі систем, коли в ланцюзі статора машини має місце несиметрія, зокрема, включені транзисторні ключі автономного інвертора, або існує коротке замикання статорних ланцюгів. Крім того, вісь збігається з магнітною віссю фази  $a$  реальної асинхронної машини. Звідси проекція струму  $i_{S\alpha}$  і дорівнюватиме реальному струму двигуна.

Рівняння асинхронного двигуна записуємо на основі системи. При цьому вважаємо, що  $\omega_K = 0$  та  $U_r = 0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{S\alpha}}{d\alpha} = U_{S\alpha} - R_S \cdot i_{S\alpha}; \quad \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} = -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{II} \cdot \omega \cdot d\psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{S\beta}}{d\alpha} = U_{S\beta} - R_S \cdot i_{S\beta}; \quad \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} = -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{II} \cdot \omega \cdot d\psi_{r\alpha}. \end{array} \right\} \quad (11.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{S\alpha} = L_S \cdot i_{S\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}; \quad \psi_{r\alpha} = L_m \cdot i_{S\alpha} + L_r \cdot i_{r\alpha}; \\ \psi_{S\beta} = L_S \cdot i_{S\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}; \quad \psi_{r\alpha} = L_m \cdot i_{S\beta} + L_r \cdot i_{r\beta}. \end{array} \right\} \quad (11.3)$$

Для зручності побудови математичної моделі систему рівнянь виразимо через струми:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{S\alpha} = \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\alpha} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\alpha}; \quad i_{r\alpha} = -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{S\beta} = \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\beta} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\beta}; \quad i_{r\beta} = -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{array} \right\} \quad (11.4)$$

де  $L'_S = \sigma \cdot L_S$ ;  $L'_r = \sigma \cdot L_r$ ;  $k_S = \frac{L_m}{L_S}$  та  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – відповідно коефіцієнти зв'язку

статора і ротора;

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}\right) = (1 - k_s \cdot k_r) - \text{коефіцієнт розсіювання.}$$

Нам відомо, що вираз електромагнітного моменту асинхронного двигуна являє собою векторний добуток просторових векторів струму та потокозчеплень. Вибір того чи іншого виду рівняння для електромагнітного моменту здійснюється з умови раціональної побудови структурної схеми математичної моделі.

$$M_E = \frac{3}{2} \cdot p_{II} \cdot (\psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}). \quad (11.5)$$

Рівняння руху двигуна в одномасовій системі, має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} \cdot (M_E - M_C), \quad (11.6)$$

де  $J_\Sigma$  – приведений сумарний момент інерції ротора та механізму;

$M_C$  – статичний момент навантаження.

Математична модель асинхронного двигуна побудована за рівняннями у системі координат  $(\alpha, \beta)$ , за допомогою програми Matlab-simulink, наведено на рис. 11.8.

В якості вхідних напруг  $U_{s\alpha}$  та  $U_{s\beta}$  подаються сигнали від джерел SineWave:

$$U_{s\alpha} = U_m \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \cos \omega_0 t; \quad (11.7)$$

$$U_{s\beta} = U_m \cdot \sin \omega_0 t,$$

де  $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$  – амплітуда вхідної напруги;  $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$  – кутова частота електромагнітного поля статора.

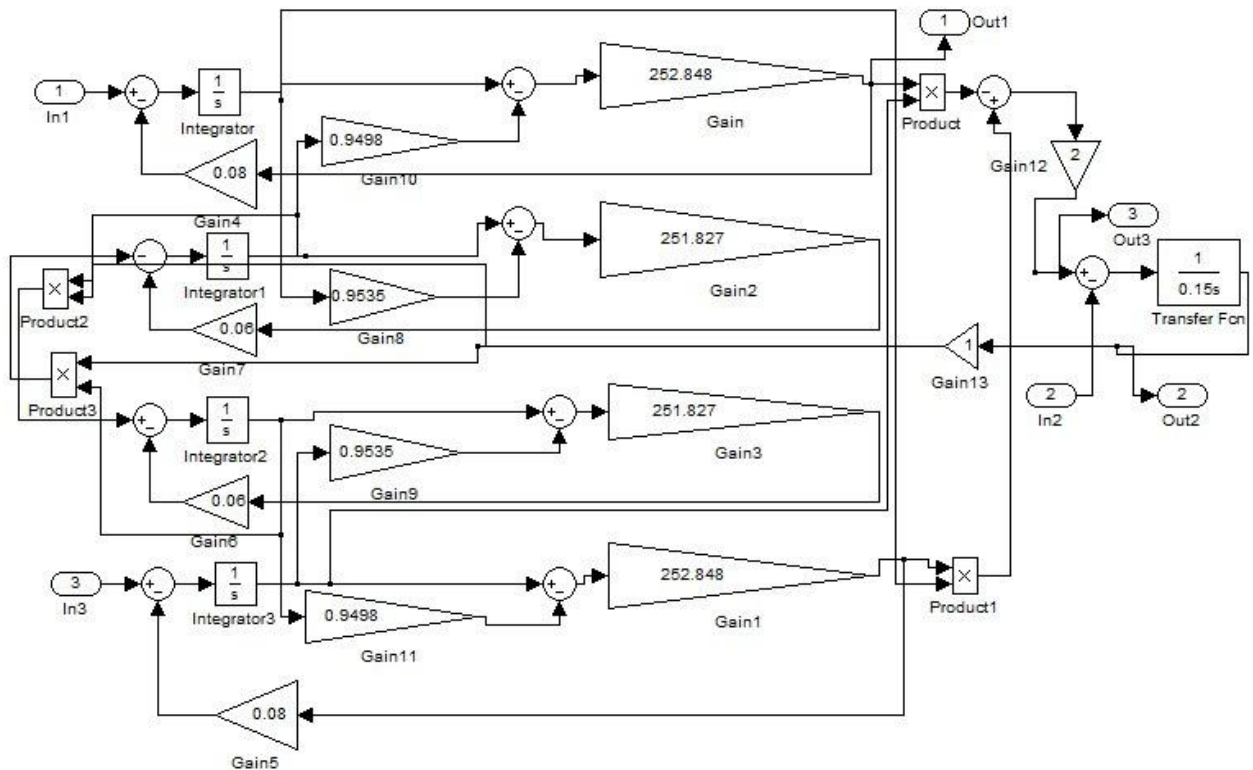


Рис.11.8. Математична модель асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором в нерухомій системі координат ( $\alpha, \beta$ )

У вікні налаштування блоку SineWave необхідно задати амплітуду – 310, кутову частоту – 157 rad/sec та фазу коливань – 1,57 rad, а у вікні налаштування блоку SineWave 1 задати амплітуду – 310, кутову частоту – 157 rad/sec та фазу коливань – 0 rad. Вікно налаштувань SineWave активізується після переносу джерела сигналу у робочу область моделювання. Застосування блоків SineWave забезпечує живлення статорних ланцюгів асинхронного двигуна двофазною змінною напругою.

Момент опору навантаження на валу двигуна створюється блоком Step.

Для дослідження роботи асинхронного електроприводу з пропорційним законом скалярного частотного управління необхідно живити статорні обмотки від моделі перетворювача частоти (модель IGBT - Inverter). Для створення моделі IGBT - Inverter використовуємо модель гармонійних коливань регульованої частоти, яка являє собою модель ідеального перетворювача частоти.

Схема моделі наведена на рис. 11.8 у зазначеній схемі зміна  $\omega_0$  і  $U_m$  у часі, тобто інтенсивність частотного пуску, задається задатчиком інтенсивності, в який входять блоки Gain, Integrator і Saturation.

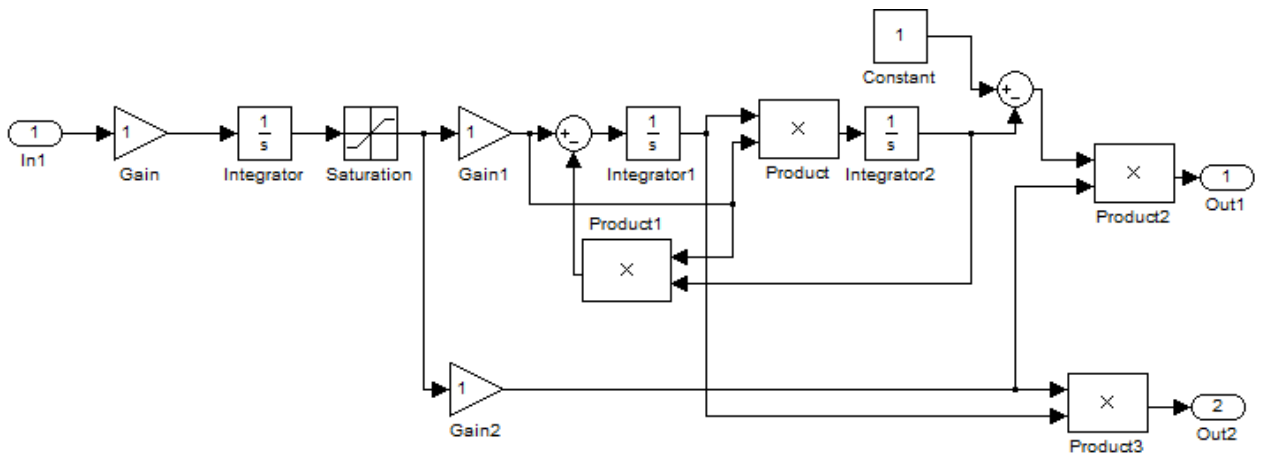


Рис. 11.9. Схема моделі IGBT-інвертор

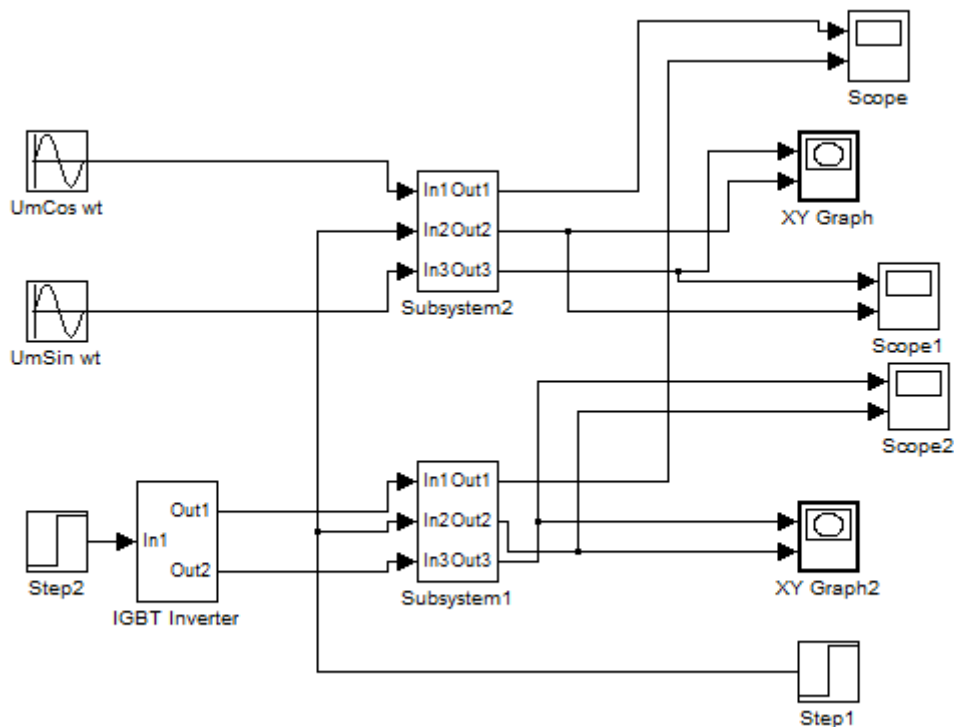


Рис. 11.10. Схема частотного пуску асинхронного електроприводу

Схема математичного моделювання (рис. 11.8) складається з двох частин, що дозволяє проводити порівняльні дослідження та аналіз електромеханічних процесів двох електроприводів.

### 11.4. Динамічні характеристики системи

На рис. 11.11, наведено порівняльні осцилограми електромагнітного моменту  $M_E$  і кутової швидкості ротора  $\omega$  асинхронного двигуна при прямому пуску та частотному пуску. При частотному пуску використовувався пропорційний закон частотного керування  $\frac{U_s}{f_s} = const.$

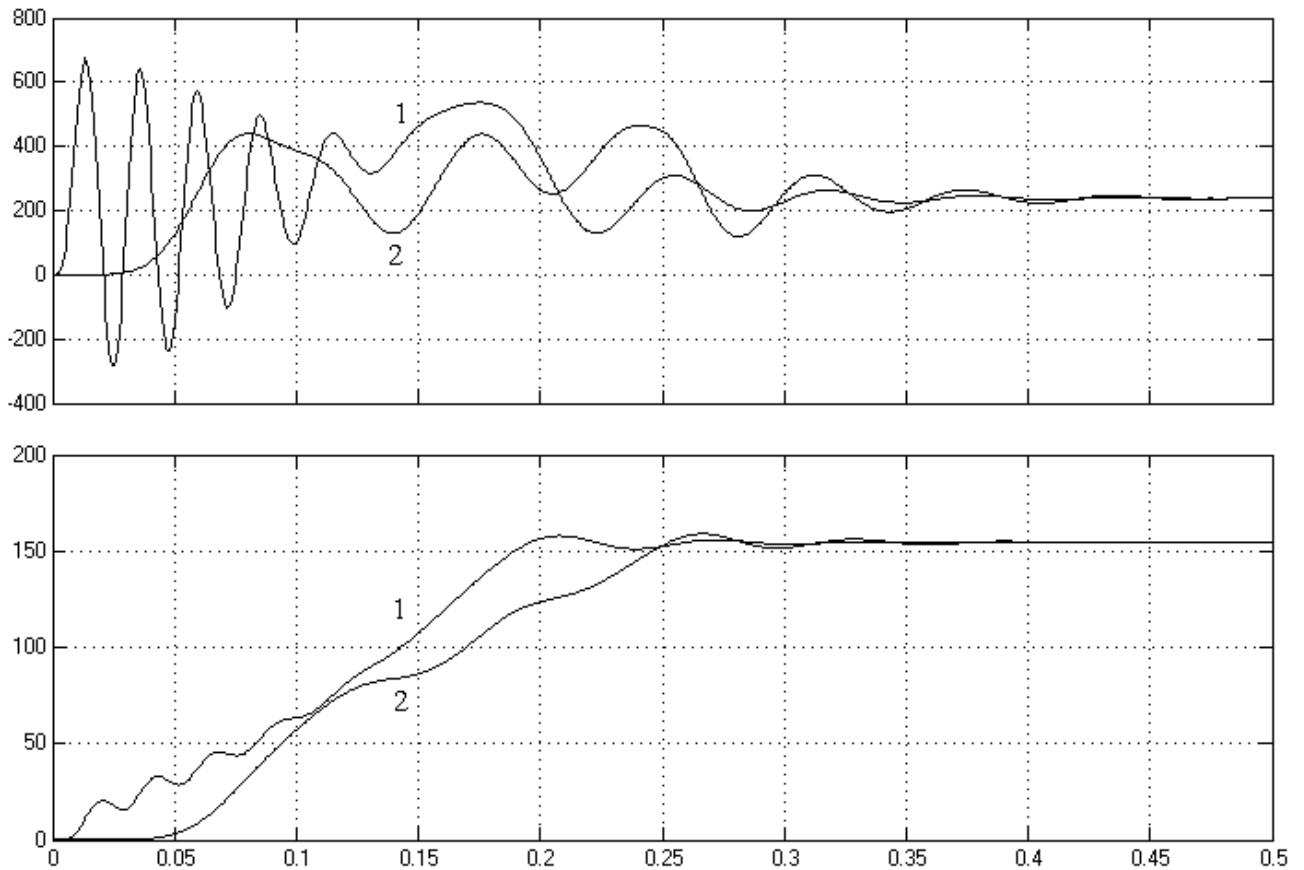
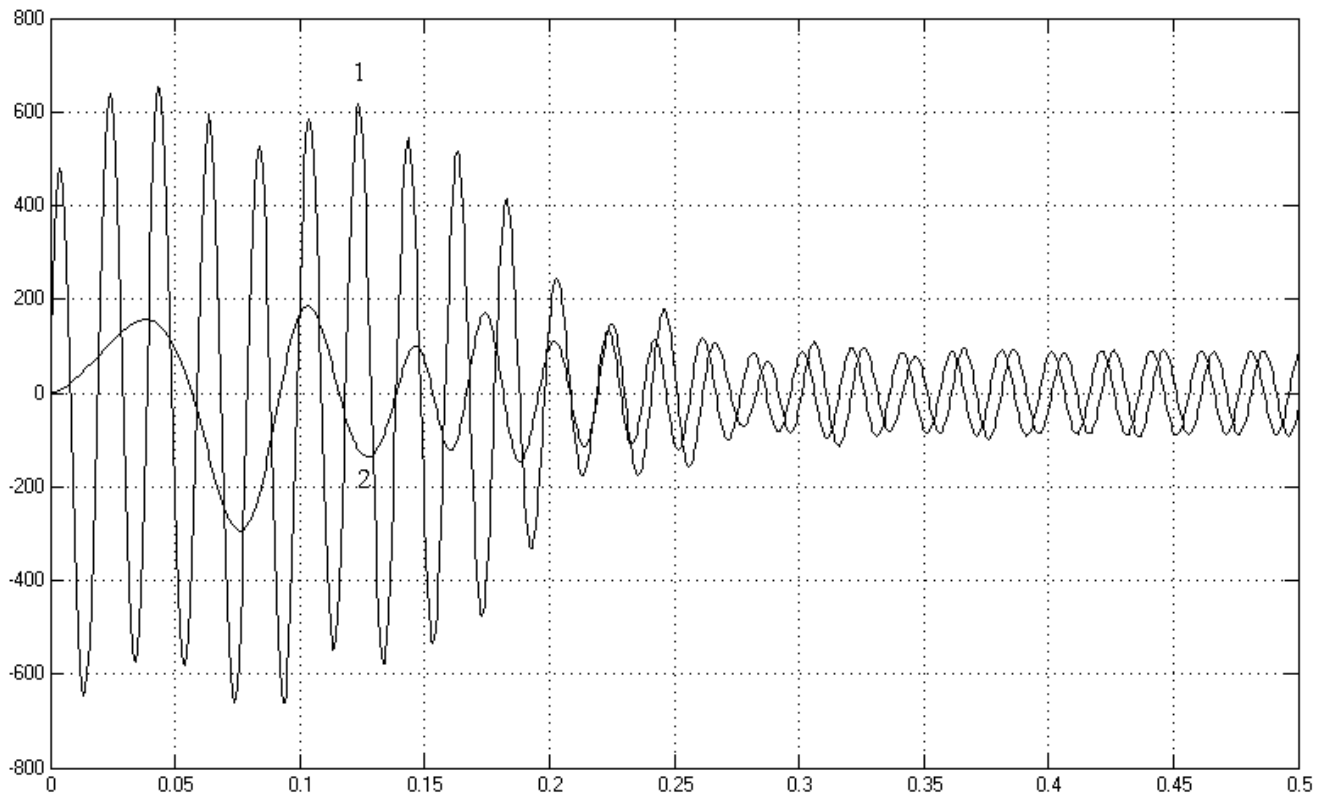
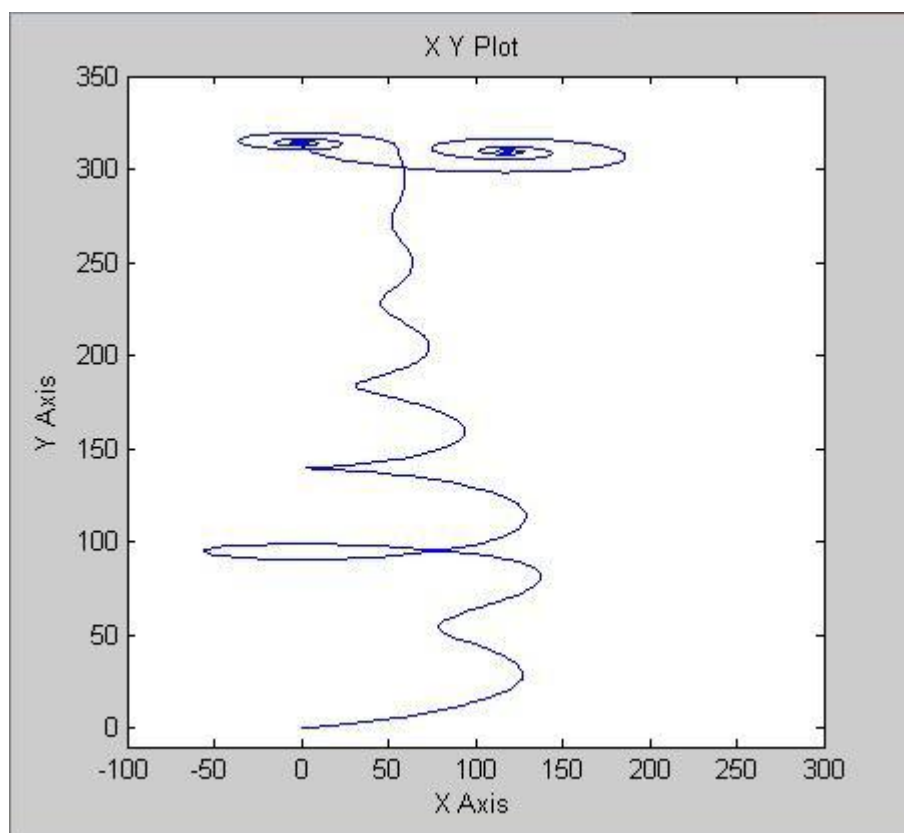


Рис. 11.11. Порівняльні осцилограми при прямому та частотному пусках двигуна

Порівняння динамічних характеристик  $\omega = f(M)$  показує, що частотне управління пуском дозволяє наблизити характеристику до кривої, що забезпечує пуск двигуна з більш постійним моментом порівняно з характеристикою прямого пуску асинхронного двигуна.

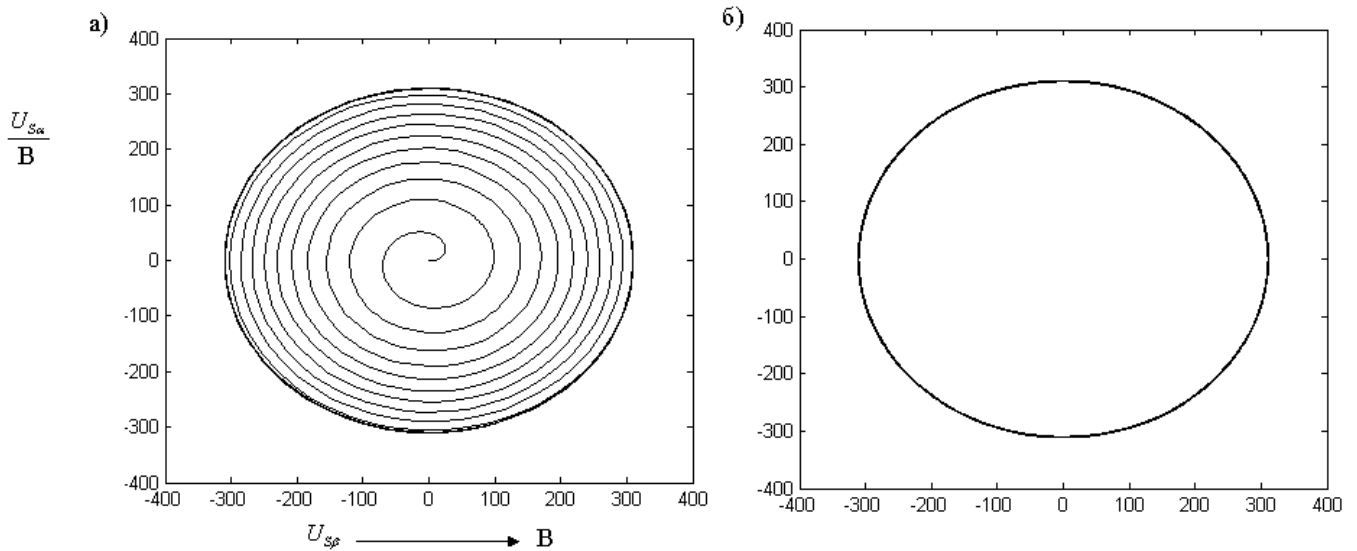


*Рис. 11.12. Порівняльні осцилограми фазного струму статорної обмотки при прямому та частотному пусках двигуна*



*Рис. 11.13. Динамічна механічна характеристика при частотному пуску двигуна*

Як видно з наведених осцилограм (рис. 11.12 та 11.13) при частотному пуску асинхронного двигуна амплітуда пускового струму у фазі А, знижується у 3,5 рази, що запобігає механічним ударам при пуску насоса і дозволяє налаштувати апаратуру пуску.



*Рис. 11.14. Годографи вектора статорної напруги:*

*а – при пропорційному частотному пуску; б – при прямому пуску*

При порівнянні годографів вектора статорної напруги можна відмітити, що годограф (рис. 11.14, а) має вигляд спіралі, поступово переходить в коло. Це свідчить про те, частота і амплітуда напруги на статорі двигуна змінюються пропорційно в процесі пуску.

Годографи вектора статорної напруги двигуна отримані при використанні блока xyGraph, у якого до входу  $x$  підключена напруга  $U_{S\alpha}$ , а до входу  $y$  – напруга  $U_{S\beta}$ . При цьому в діалоговому вікні блоку на полях  $x - \min$ ,  $x - \max$ ,  $y - \min$  та  $y - \max$  мають бути введені значення 310.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання магістерської роботи щодо вибору параметрів елементів СЕП електромеханічного заводу м. Мукачево, на основі проведених розрахунків прийняті такі нижче наведені рішення.

1. Виконані розрахунки електричних навантажень заводу за коефіцієнтом попиту та інструментального цеху за методом упорядкованих діаграм. Повна розрахункова потужність заводу з боку ВН трансформаторів ГПП з урахуванням компенсації реактивної потужності та втрат в трансформаторах склала 21142 кВА.

2. Визначено координати розміщення цехових ТП за мінімумом приведених затрат в кабельних лініях. При такому розміщенні витрати на спорудження, а також сумарні затрати по СЕП заводської мережі будуть мінімальними.

3. На підставі техніко-економічного порівняння варіантів по вибору оптимальної напруги живлення заводу, встановлено, що доцільніше виконати зовнішнє електропостачання по дволанцюговій ЛЕП перерізом  $120 \text{ мм}^2$  на напругу 35 кВ з установкою на ГПП двох силових трансформаторів типу ТДН-16000/35 для забезпечення надійного живлення споживачів II категорії надійності електропостачання. За економічністю і надійністю електропостачання вибрано схему двох блоків трансформатор-лінія, які для більшої гнучкості з'єднуються між собою неавтоматичною перемичкою з двох роз'єднувачів. У нормальному режимі один з роз'єднувачів розімкнутий.

4. Знайдено економічно обгрунтоване оптимальне число, потужність та місце розташування цехових ТП з урахуванням компенсації реактивної потужності, а саме встановлено, що для живлення заводу найбільш оптимальним є варіант із 28 трансформаторів потужністю 1000 кВА. Розподіл електричної енергії виконано із закритого розподільчого пункту (ЗРП-10кВ) ГПП, а електроживлення цехів – з центрального розподільчого пункту (ЦРП-10 кВ) за радіальною схемою 10 двотрансформаторними підстанціями і 8 однострансформаторними. При цьому сумарна потужність батареї конденсаторів на стороні напругою 0,4 кВ склала 5,584 Мвар. Повну потужність батареї конденсаторів на напругу 0,4 кВ розподілено по

цехових трансформаторних підстанціях пропорційно споживання реактивної потужності.

5. Визначено оптимальний переріз алюмінієвих кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену 10 кВ заводської мережі, які прокладені в траншеях маркою NA2XS2Y6/10kV перерізом 70 мм<sup>2</sup>, оскільки за результатами розрахунку струмів короткого замикання мінімально стійкий переріз складає 63 мм<sup>2</sup>.

6. Для вибору і перевірки електротехнічних апаратів і струмопровідних частин електроустановок, вибору вставок спрацювання релейного захисту на стороні високої і низької напруги, в роботі виконано розрахунок струмів короткого замикання на відповідних ділянках схеми електропостачання заводу. Зокрема, на стороні напругою 35 кВ встановлено елегазовий вимикач типу ВГГ-35-50/3150 та роз'єднувач типу РНДЗ-1-35/1000; у якості комутаційних апаратів на стороні напругою 10 кВ та захисту кабельних ліній від струму короткого замикання вибрано вакуумні вимикачі типу ВВ/TEL-10. З метою здешевлення розподільчого пристрою підстанції, у цехових ТП і КТП з боку високої напруги встановлено вимикачі навантаження типу ВВП-17 із запобіжником ПК-10/100 безпосередньо перед трансформаторами, які конструктивно являють собою комбінацію запобіжника і комутаційного апарату, оснащеного дугогасильною камерою.

7. Для обліку та вимірювання режимних параметрів системи електропостачання заводу вибрано трансформатори струму і напруги, зокрема трансформатори струму встановлено на стороні 35 кВ ГПП, на вводах високовольтних вимикачів типу ТФНД-35М; на вводах у ЗРП-10 кВ; на відходящих шинах ЗРП-10 кВ типу ТПОЛ-10; на відходящих шинах ЦРП, на вводах високовольтних вимикачів типу ТПЛ-10. На кожній секції шин ГПП передбачаємо встановлення трифазного, триобмоткового трансформатора напруги типу НТМИ-10-66, при цьому обмотка, що з'єднана в зірку, використовується для вимірювальних приладів, а до обмотки, що з'єднана в розімкнутий трикутник, приєднуюється реле захисту від замикання на землю. Для обліку активної і реактивної енергії вибрано лічильник типу FINTRONIC ФПН-2306.

8. За результатами розрахунку максимального навантаження інструментального цеху, яке склало 749 кВА, усі електроспоживачі цеху розподілено на тридцять п'ять розподільчі шафи типу ШР-11-73. Електропостачання цеху виконано від КТП-9 двома магістральними шинопроводами, на виході силових трансформаторів встановлено шафи типу ШП з викатними автоматичними вимикачами типу «Електрон». Для заживлення силових пунктів цеху використано кабель типу НРГ з гумовою маслостійкою оболонкою, яка не розповсюджує горіння, а для живлення споживачів вибрано провід марки АПВ з алюмінієвими жилами. Усі електроспоживачі цеху захищаються запобіжниками (час спрацювання  $t_{сп}=0,005$  с).

9. За побудованими картами селективного захисту електромережі заводу та від ТП до найбільш віддаленого електроспоживача, встановлено, що селективність захисту повністю забезпечена для надійного спрацювання апаратів захисту.

10. За результатами побудови епюри відхилення напруги в максимальному, мінімальному та післяаварійному режимі роботи, встановлено, що відхилення напруги перебувають в межах встановлених допустимих норм і не перевищують  $\pm 5$  % для силової мережі та  $+5\% \div - 2,5$  % – мережі електричного освітлення.

11. В спеціальній частині магістерської роботи проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB Simulink частотно-регульованого електроприводу на базі частотного перетворювача MIKRO-MASTERvektor та асинхронного двигуна виконання 4A200L4U3 насоса водогрійного котла.

12. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що частотне управління пуском дозволяє наблизити характеристику до кривої, що забезпечує пуск двигуна з більш постійним моментом порівняно з характеристикою прямого пуску асинхронного двигуна, при частотному пуску асинхронного двигуна амплітуда пускового струму у фазі А, знижується у 3,5 рази, що запобігає механічним ударам при пуску насоса і дозволяє налаштувати апаратуру пуску, годограф при пропорційному частотному пуску має вигляд спіралі та поступово переходить в коло, а отже частота і амплітуда напруги на статорі двигуна змінюються пропорційно в процесі пуску.

Отже, можна зробити висновок, що спроектована система електропостачання відповідає всім вимогам ПУЕ, ПТЕ, ДБН та іншим чинним нормативно-технічним документам України і може забезпечити надійне, безперебійне та якісне електропостачання електромеханічного заводу м. Мукачево. Крім того, застосування частотного керування при пуску та регулюванні швидкості обертання вала насоса водогрійного котла, призводить до істотного зниження втрат електроенергії при роботі асинхронного двигуна.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. – Вінниця: Нова книга, 2011 р. – 656 с.
2. Розрахунки при проектуванні та реконструкції систем електропостачання промислових підприємств: Навч. Посібник / О.М.Сірий, В.Є.Шестеренко. – К.: ІСДО, 1993. – 592 с.
3. Сірий О.М. Системи електроспоживання: розрахунки, вибір обладнання: навч. посіб. / О.М.Сірий; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т харч. технол. – К.: НУХТ, 2011. – 319 с.
4. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Київ: Каравела, 2018. – 272 с.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджено Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 р. № 476.
6. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник /С.В.Панченко, В.С.Блиндюк, В.М. Баженов та ін.; за ред. В.М.Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч.1. – 250 с.
7. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник Ч.2 / укл. Д.П.Козярьський, Е.В.Майструк, І.П.Козярьський. – Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. – 130 с.
8. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини.: Навч. посібник – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.

9. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник /О.І.Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

10. Дослідження частотно-регульованого електроприводу насоса водогрійного котла /Василь Йовбак, Максим Кондрашевський, Сергій Балюта //89 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті" 3-7 квітня 2023 р., Частина 2, К. – 2023. С.290.

11. Dr.-Ing. GerdScheffelVariable Frequency Drives as Pump Prime Movers // Energy Efficient Hydraulics. – Speech @ Fluid Power Society Conference in Chicago on 28.10.2012. – 2013. – 3 pp.

12. Lakhya Jyoti Phukon<sup>1</sup>, NeelanjanaBaruahA Generalized Matlab Simulink Model of a Three Phase Induction Motor // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. -2015. - Vol. 4, Issue 5. pp 2926 – 2934.

13. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrelcom.com>.

14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.samgas.com.ua/ua/4clients/products/>.

15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://waterpump.com.ua/directory/>.

16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aipr.com.ua/vse-dvigateli/>.